

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

PROGRAMA DE GRADUADOS DE LA DIVISIÓN
DE HUMANIDADES Y CIENCIAS SOCIALES



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY®**

PAUL EHRENFEST Y LOS TEMAS CRUCIALES EN EL
SURGIMIENTO DE LA FÍSICA MODERNA (1904-1924)

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

DOCTOR EN ESTUDIOS HUMANÍSTICOS
CON ESPECIALIDAD EN CIENCIA Y CULTURA

POR:

RICARDO GUZMÁN DÍAZ

MONTERREY, N.L.

Noviembre 2007

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY**

**PROGRAMA DE GRADUADOS DE LA DIVISIÓN
DE HUMANIDADES Y CIENCIAS SOCIALES**

**Los miembros del comité de tesis recomendamos que la presente tesis de
Ricardo Guzmán Díaz
sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado académico de**

**Doctor en Estudios Humanísticos
con especialidad en Ciencia y Cultura**

Comité de Tesis

Dr. José Antonio Cervera Jiménez
Asesor

Dr. Julio Ernesto Rubio Barrios
Sinodal

Dr. Javier Ordóñez Rodríguez
Sinodal

Dra. Blanca Guadalupe López Morales
Directora del Programa de Maestría y
Doctorado en Estudios Humanísticos

Noviembre del 2007

Prefacio

Es mi convicción que todo lo que hace uno en la vida, especialmente cualquier trabajo de carácter intelectual, tiene sus orígenes en los primeros años de formación donde el individuo comienza a perfilar sus intereses por diferentes campos del conocimiento. Desde temprana edad, y con un cierto temperamento filosófico, me interesé por la Historia de la Ciencia, por tener idea de cómo la humanidad ha tratado y, sorprendentemente, ha logrado arrebatarse secretos a la naturaleza, y construirse con eso una cosmovisión basada, no en pura especulación intelectual, sino en un conocimiento relativamente fiable basado en la imaginación, la creatividad, la razón y la comprobación experimental, aun con todo lo endeble, temporal y precario, que una humilde actitud científica debe, sin embargo, reconocer. Pero fue hace poco tiempo, en el año 2001, que pude renovar y profundizar mi interés por la Historia de la Ciencia, primero a través de los cursos que nos ofreció Javier Ordóñez a profesores del ITESM y posteriormente con mi ingreso al Doctorado en Estudios Humanísticos con especialidad en Ciencia y Cultura del mismo instituto.

La elección del tema de esta tesis surgió de pláticas posteriores que sostuve con mi maestro Javier Ordóñez. El me hizo ver que mi interés en la Historia de la Ciencia se inclinaba más por los temas que implicaban consideraciones de carácter filosófico y epistemológico. Y qué tema más acorde con eso que los orígenes de la física moderna, caracterizado precisamente por una serie de rupturas conceptuales fundamentales. A pesar de ser el desarrollo de la física moderna un tema tratado ampliamente por otros historiadores de la ciencia, Javier hizo de mi conocimiento la existencia de un científico no muy conocido, poco estudiado, y que sin embargo jugó un papel importante en el surgimiento de la física moderna. ¿Por qué no adentrarnos un poco en el misterio de este personaje? Ese científico es Paul Ehrenfest, protagonista central de esta tesis.

Por lo demás, debo decir que, así como mencionaba arriba que todo lo que uno hace, a nivel individual, viene moldeado por la historia personal, de igual manera estoy convencido de que lo que somos como humanidad no puede explicarse sin

volver la vista al pasado y buscar ahí los orígenes de nuestra racionalidad, de nuestra constitución moral, de nuestra cultura, en una palabra, de lo que somos. No es posible construir un proyecto de humanidad si no entendemos primero de dónde viene el conocimiento que poseemos, sus significados, sus transformaciones, etc. Por eso, tengo la esperanza de que este trabajo aporte un pequeño grano de arena a nuestra comprensión del desarrollo científico en la historia.

Pasando al rubro de los agradecimientos, y para empezar en orden cronológico, debo empezar por quien me hizo dirigir la mirada hacia estos temas, mi maestro, ya mencionado arriba, Javier Ordóñez. A Javier le agradezco su atención siempre amable y su disposición para escuchar a pesar de tener su tiempo tan limitado. Gracias a él, a sus clases, a sus ensayos, a sus libros y a su enfoque tan rico, tan diverso y multifacético de ver la ciencia, pude encontrar la inspiración para dirigir mis esfuerzos hacia los temas que más me motivaban y focalizarlos posteriormente a esta tesis.

Para José Antonio Cervera, mi maestro de Filosofía de la Ciencia y asesor de esta tesis le agradezco de igual manera no sólo su guía profesional, sino también su amistad, demostrada con creces en tantas oportunidades de convivencia y de charla amena. Sin su ayuda y apoyo, la agradable experiencia de escribir esta tesis no habría sido la misma. En esta misma tesitura debo mencionar la presencia de todos los compañeros y maestros de las clases de Proyecto de Investigación y de Seminarios bajo la guía de Judith Farré y el propio José Antonio Cervera. A todos ellos mi profundo agradecimiento por su compañía, por su amistad y por sus comentarios siempre oportunos relacionados con los avances de mi trabajo.

Mi agradecimiento también para Julio Rubio a quien me encontré de nuevo después de muchos años y me ayudó a caminar por esta nueva senda del conocimiento y a tener un panorama amplio de los estudios sobre la ciencia. Su

orientación sobre todos los asuntos del doctorado en general y sobre mi tesis en particular ha sido muy valiosa.

Por último, pero poniéndolos siempre en primer plano, mi más profunda gratitud a mi familia. A mi esposa Rosa María y a mis hijos David y Javier por su comprensión y por dispensar mi falta de atención hacia ellos para poder concluir este proyecto. A mi madre por su confianza y por su amor incondicional. A mi padre †, quien me transmitió el amor por el conocimiento, me enseñó a pensar críticamente, a festejar la vida y admirarme de la existencia y del mundo.

Tendría que citar también a muchísimas personas más que de una u otra manera, directa o indirectamente, tuvieron una influencia positiva en la realización de esta tesis. No hay necesidad de mencionar por nombre a cada una de ellas, pero vaya aquí todo mi agradecimiento para esas almas generosas.

Tabla de contenidos

Prefacio	3
Tabla de contenidos	6
Introducción	8
Campo de estudio	8
Intenciones	13
Estructura de los contenidos	14
Recuento de aportaciones	17
1 Paul Ehrenfest y la física en su tiempo	18
1.1 La física en un período de crisis	20
1.2 Física: experiencia, teoría e imaginación	27
1.2.1 Teoría, experimento y filosofía de la ciencia	28
1.2.2 Elementos para entender la actividad científica	31
1.2.3 El papel de la imaginación en la ciencia	34
1.2.3.1 La metáfora	35
1.2.3.2 La imaginación temática	37
1.3 La física como fuerza civilizadora	40
1.3.1 Fin de siglo: una revolución intelectual	41
1.3.2 Institucionalización y nuevos compromisos y objetivos de la física	46
1.4 Semblanza de Paul Ehrenfest: el hombre, el maestro y el físico teórico	49
1.4.1 Años de formación	51
1.4.2 Ehrenfest como profesor y como crítico de su disciplina	55
1.4.3 Ehrenfest: la física y otros intereses	62
1.4.4 Ehrenfest: internacionalización y las funciones sociales de la física	67
1.4.5 Desesperanza, tragedia y muerte de Ehrenfest	69
2 Origen, ascenso y muerte de la hipótesis del éter y el ojo crítico de Paul Ehrenfest ..	71
2.1 Planteamientos preliminares	73
2.1.1 Consideraciones y cuestionamientos desde la filosofía de la ciencia	73
2.1.2 Antecedentes históricos en la concepción del éter	75
2.2 La visión de Ehrenfest en torno al éter	77
2.2.1 Ehrenfest y el éter	78
2.2.2 Pugna entre teorías	81
2.2.3 Posibles salidas a la crisis	84
2.3 ¿Muerte de la hipótesis del éter?	90
2.4 Conclusiones	92
3 La mecánica estadística: sus orígenes y sus paradojas a la luz de los escritos de Paul y Tatiana Ehrenfest	94
3.1 Bosquejo histórico de la mecánica estadística	96
3.2 Filosofía de la mecánica estadística	99
3.3 Boltzmann visto por Paul Ehrenfest	103
3.4 Los Ehrenfest y la mecánica estadística	108
3.5 El artículo de los Ehrenfest en la Encyklopädie	114
3.6 Conclusiones	120
4 La radiación del cuerpo negro y la discretización de la energía: Paul Ehrenfest y el drama cuántico	122

4.1	La aparición del cuanto	124
4.1.1	La espectroscopia y el concepto de radiación de cuerpo negro.....	125
4.1.2	El cuanto de Planck y la crítica de Ehrenfest	129
4.1.2.1	La contribución de Planck	129
4.1.2.1	El análisis de Ehrenfest	136
4.1.3	El cuanto de Einstein: Ehrenfest señalando una diferencia crucial.	140
4.2	La necesidad del cuanto y la crítica de Ehrenfest.....	145
4.2.1	El artículo de Ehrenfest de 1911	146
4.2.2	Una circunstancia desafortunada: La conferencia Solvay, Poincaré y Ehrenfest.	150
4.3	Conclusiones	155
5	Construyendo puentes hacia una nueva forma de entender la realidad física: Paul Ehrenfest y su contribución en la búsqueda de principios y nuevas interpretaciones	158
5.1	El principio adiabático	159
5.1.1	Orígenes del principio adiabático	159
5.1.2	El modelo de Bohr y la reacción de Ehrenfest	161
5.1.3	Construyendo puentes: Ehrenfest y el principio adiabático	163
5.2	Bohr y el principio de correspondencia	167
5.2.1	El principio de correspondencia	168
5.2.2	Bohr y Ehrenfest	172
5.3	El experimento de Stern y Gerlach comentado por Einstein y Ehrenfest y la amenaza a la causalidad.....	176
5.4	Conclusiones	180
6	Epílogo: Génesis de la mecánica cuántica.....	182
	Conclusiones	188
	Apéndices.....	191
A 2.1	Sobre la crisis en torno a la hipótesis del éter lumínico	192
A 2.2	Sobre la pregunta en torno a lo superfluo del éter lumínico.....	207
A 3.1	Sobre una tarea del cálculo de probabilidades, en conexión con la interpretación cinética del incremento de la entropía.....	213
A 3.2	Ludwig Boltzmann.....	218
A 3.3	Sobre dos conocidas objeciones contra el teorema H de Boltzmann.....	228
A 4.1	Sobre las suposiciones físicas de la teoría de Planck de los procesos de radiación irreversibles.....	237
A 4.2	Sobre la teoría de la radiación de Planck	251
A 4.3	¿Qué aspectos de la hipótesis del cuanto de luz juegan un papel esencial en la teoría de la radiación térmica?.....	260
A 5.1	El Principio de Correspondencia	273
A 5.2	Anotaciones teórico-cuánticas sobre el experimento de Stern y Gerlach.....	281
A 5.3	Transformaciones adiabáticas en la teoría cuántica y el tratamiento que de ellas hace Niels Bohr	286
	Referencias.....	290

Introducción

Tal vez sea difícil justificar un trabajo como el presente, que trata sobre el periodo de crisis que sufrieron las ciencias físicas a principios del siglo XX, debido a la amplia literatura que hay sobre el tema. Sin embargo, las nuevas formas de abordar la historia de la ciencia, van mucho más allá de una mera crónica, y la convierten en una empresa de naturaleza explicativa, donde un sinnúmero de perspectivas o dimensiones diversas (social, cultural, psicológica, personal, filosófica, etc.) pueden dar luz para comprender los desarrollos científicos. En este sentido, creemos que una contribución más a un tema ya ampliamente tratado, no necesariamente resultará superfluo, sino que puede representar un elemento explicativo adicional que, en suma con los demás, ofrezca un mayor entendimiento. Al acercarnos a un personaje, Paul Ehrenfest, que no aparece de manera relumbrante en las historias contadas, pero que parecía ofrecer aproximaciones interesantes al tema, nos convencimos de que adentrarnos en su estudio podría significar una contribución al tema, si bien humilde, de todas maneras importante.

Campo de estudio

1- La crisis de la física del siglo XIX

El trabajo de investigación que se presenta aquí tiene que ver con el periodo de transición ocurrido a principios del siglo XX en las ciencias físicas, de manera que tenemos que tener en cuenta lo que prevalecía en el siglo anterior para poder ubicar nuestro campo de estudio.

A lo largo del siglo XIX, en la ciencia de la física predominó el programa de explicación mecánica de la naturaleza. Por supuesto, se reconocían diferentes manifestaciones fenoménicas como el calor, la electricidad, el magnetismo y la luz, pero con la aparición de la física de la energía se desarrolló un principio unificador

que reducía todo fenómeno físico a materia en movimiento. Así, el calor se interpretaba como la vibración de partículas materiales y la propagación de la luz como vibración de una sustancia que llenaba todo el espacio, el llamado éter.

El propósito último de la física se reducía así a dar cuenta del movimiento continuo en el espacio de las partículas materiales, dada su interacción con el resto de las partículas. Detrás de esta tarea encontramos supuestos epistémicos que nos hablan de un mundo continuo y determinista en el que se suceden acontecimientos siguiendo una relación causal. Dadas las condiciones iniciales de posición y velocidad de las partículas, sería en principio posible predecir su estado futuro aplicando las leyes de interacción entre ellas.

Hacia finales del siglo XIX empezaron a surgir diferentes incompatibilidades en los distintos campos de la física. Por ejemplo, los datos aportados por la teoría cinética de los gases por un lado, y por la espectroscopia por el otro, no concordaban al momento de querer deducir características de la estructura molecular. Entre los diferentes esfuerzos realizados para evitar el desmembramiento de la física surgió la mecánica estadística, a la cual podemos encontrar como uno de los antecedentes fundamentales de la física cuántica.

Además, no todos los científicos compartían este programa de explicación mecánica. Algunos realizaban esfuerzos por dotar a la física de una base fenomenológica (un tipo de positivismo) basada en correlaciones de observaciones más directas evitando usar entidades “hipotéticas” como las partículas atómicas u otros mecanismos.

Todo esto nos habla de un período de crisis en las ciencias físicas, cuya salida tendría profundas interrelaciones con la cultura, las manifestaciones filosóficas y otras áreas del conocimiento. El resultado de este período de transición hacia una nueva física implicaría una visión del mundo enteramente nueva en la que se desecharían ideas tan fundamentales como el carácter determinístico y continuo del mundo físico que había prevalecido en el pasado.

2- La transición de la física clásica a la física cuántica

El surgimiento de la teoría cuántica antigua se asocia principalmente a los nombres de Planck y Einstein con sus trabajos en torno al problema de la radiación del cuerpo negro y al efecto fotoeléctrico.

El problema de la radiación del cuerpo negro está ligado a la teoría cinética de los gases y la mecánica estadística, porque una forma de abordarlo era considerar el comportamiento de la radiación electromagnética en una cavidad como si fuera un gas perfecto en equilibrio con las paredes de su contenedor. Ahora bien, una de las leyes básicas de la mecánica estadística es el teorema de equipartición de energía que establece que la energía total contenida en un conjunto grande de partículas individuales que intercambian energía a través de sus colisiones se divide por igual (en promedio) entre todas las partículas. Pero si se aplicaba esto a la radiación electromagnética (como lo hicieron Rayleigh y Jeans), asumiendo que toda la energía de radiación se distribuye por igual en todas las frecuencias, los resultados no concordaban con los experimentos. Fue Planck quien recurrió a nuevas ideas para encontrar la fórmula matemática correcta de la distribución de la radiación que se correspondía con la experiencia y justificarla después teóricamente introduciendo el cuanto de energía (paquetes de energía), lo cual para muchos representa el nacimiento de la revolución cuántica. Sin embargo es importante mencionar que en esto hay controversia pues algunos historiadores, como es el caso de Kuhn, sostienen una interpretación en el sentido de que Plank realmente no tenía en mente nada parecido a la cuantización.

Muy relacionado con los puntos anteriores tenemos el asunto del efecto fotoeléctrico. El primero en conocer el efecto (como una transformación de luz en electricidad) fue Lenard, quien notó que la fotocorriente es proporcional a la intensidad de la luz, que hay un potencial de corte, y que la energía cinética de los electrones no era afectada por la intensidad y que la velocidad máxima dependía del tipo de luz (frecuencia). Estos experimentos fueron explicados por Einstein en un

artículo publicado en 1905 en el que sugiere, sustentándolo teóricamente, que la radiación monocromática se comporta, en un sentido termodinámico, como si consistiera de cuantos de energía mutuamente independientes.

Todo esto nos habla del desarrollo, a principios del siglo XX, de nuevas formulaciones, detrás de las cuales hay una serie de elecciones radicales sobre el tipo de descripción de los fenómenos y las herramientas conceptuales utilizadas. Es probable que estas elecciones dependan no solamente de aspectos internos de la disciplina, sino de las relaciones con las necesidades técnicas, el entorno social, el contexto cultural, etc. Por ejemplo, los modelos basados en entidades no observables y el uso de herramientas estadísticas se hacen ahora cada vez más necesarios para las nuevas tareas que se le exigen a la nueva ciencia.

Después de los trabajos de Planck y Einstein, en 1913 Niels Bohr aplicó la cuantización a la descripción de la energía mecánica de los electrones en un átomo partiendo del modelo planetario de Rutherford, el cual por un lado tenía bases experimentales muy sólidas, pero por otro presentaba claras contradicciones con la física clásica. Entre otras cosas, Bohr pudo explicar la posición de las líneas espectrales del hidrógeno, sentando las bases de un desarrollo científico sin precedentes que permitió comprender las propiedades de los elementos. Aún así, la teoría de Bohr resultaba claramente incompleta pues fallaba en calcular, por ejemplo, las intensidades de las líneas espectrales mencionadas.

Faltaban aún otros caminos por recorrer para que quedara firmemente establecida la nueva mecánica cuántica. En 1925 Louis de Broglie dio una nueva interpretación de las órbitas cuánticas de Bohr que sirvió de fundamento para la teoría ya más completa de Erwin Schrödinger conocida como mecánica ondulatoria. Casi simultáneamente Heisenberg desarrolló una forma equivalente de la teoría pero en forma de mecánica matricial que ofrecía los mismos resultados en lo que se refiere a la estructura atómica y sus espectros.

En la nueva física se renuncia de manera deliberada a los métodos explicativos de la física clásica, es decir, se hacen a un lado los principios de

continuidad espacio-temporal de los fenómenos físicos y, sobre todo, se considera innecesaria la aceptación de una causalidad estricta de las leyes naturales. Algunos historiadores de la ciencia consideran que el tránsito hacia la nueva física está fuertemente ligado al ambiente sociocultural que dominaban en la época en donde tenían lugar estos desarrollos científicos. Paul Forman, por ejemplo, sostiene una tesis en el sentido de que en Alemania, durante la República de Weimar, se vivía un ambiente intelectual antirracionalista, neorromántico y de clara repulsa hacia el mecanicismo y la causalidad, al cual tuvieron que adaptarse los físicos y matemáticos de la época, generando, como consecuencia, un movimiento entre estos científicos encaminado a abandonar el principio de causalidad.

Dentro del escenario que aquí hemos descrito, aparece Paul Ehrenfest viviendo de cerca y en carne propia todos los desarrollos de la física que aquí hemos reseñado, haciendo aportaciones importantes, criticando el rumbo de la disciplina, estableciendo relaciones importantes con físicos de la talla de Einstein o Bohr y, como todos ellos, viviendo bajo el influjo de una sociedad cambiante en las primeras décadas del siglo XX.

3- Paul Ehrenfest

Paul Ehrenfest fue uno de los científicos que participó en el desarrollo de la nueva física. Martin Klein y otros historiadores han escrito sobre él y su contribución, pero aún queda mucho por explorar en torno a este hombre singular. Ciertamente lo poco que se conoce de él no hace justicia a la importancia de su contribución y a las claves que su historia científica y personal podrían aportar para comprender mejor algunos aspectos del surgimiento de la física moderna. Aunque ninguna gran teoría lleva su nombre, Paul Ehrenfest se sitúa justo en la confluencia de las ideas que definirían la nueva física y fue una de las personas más comprometidas en su desarrollo, como lo muestra el apelativo que le daban sus colegas de “la conciencia de la física”.

Paul Ehrenfest es probablemente la mejor personificación del drama que tuvo lugar en la física. La gradual formulación de la física moderna, liderada por varios de

sus amigos cercanos, lo llevó a la desesperación, la depresión y la autocrítica. Al final, tomaría la misma decisión que su maestro Boltzmann: el suicidio. En una carta escrita a sus mejores amigos, pero que nunca fue enviada, expresaba su estado de ánimo, su sentimiento de inutilidad y su decisión de quitarse la vida. Con Ehrenfest nos topamos con un personaje singular, un gran maestro, un crítico de su disciplina y sobre todo de sí mismo y cuya vida estuvo inextricablemente ligada a los temas cruciales de la física de principios del siglo XX.

El objetivo de esta tesis es ofrecer una perspectiva que profundice y aporte elementos nuevos para la comprensión del proceso de transición de la física clásica a la física cuántica siguiendo el desarrollo científico y personal de Paul Ehrenfest. Se hará una reconstrucción parcial de la manera en que Paul Ehrenfest recogió las nuevas ideas que iban surgiendo en la física, la forma en que las aceptaba o rechazaba y la manera en que él mismo señalaba y criticaba el rumbo que iba tomando la física a la vez que ofrecía sus propias aportaciones al debate científico.

Intenciones

Como ya lo hemos mencionado, por medio de este trabajo de investigación queremos dar una mirada particular a las ideas, conceptos y debates fundamentales que se dieron en el campo de la física a principios del siglo XX desde la perspectiva de un hombre con una personalidad muy especial, llamado Paul Ehrenfest, que se encontró siempre en el centro de los acontecimientos. Sin embargo, también queremos destacar que nuestra mirada tendrá, en varios momentos, ciertos sesgos que podemos caracterizar con las siguientes intenciones.

- 1- Contribuir a mostrar a la ciencia como una aventura intelectual y una fuerza cultural, inmersa en una serie de presuposiciones temáticas, de imaginación creativa y diversidad de retóricas a la par de su caracterización meramente empírica y lógica.

- 2- Enfatizar el carácter conflictivo y contingente del desarrollo científico, donde el “progreso” con frecuencia se ve entorpecido por concepciones mal encaminadas, pero en un momento dado capaces de abrir nuevos dominios de entendimiento.
- 3- Mostrar el particular talante filosófico de que estaban dotados los físicos de esa época.

Estructura de los contenidos

La presente tesis no pretende ser un estudio exhaustivo de la vida y obra de Paul Ehrenfest. De hecho, el núcleo del estudio se centra en el periodo de 1904 a 1924, dentro del cual, además, sólo se consideraron algunos trabajos de Ehrenfest especialmente seleccionados para poder cumplir con nuestro objetivo de darle una mirada a los temas cruciales de la física de esa época. Para explicar la manera en que está pensado y estructurado este trabajo es necesario explicar primeramente cuáles son esos temas capitales y de qué manera los queremos relacionar.

Los temas cruciales a los que nos referimos tienen que ver con las tensiones existentes en la tarea de explicación del mundo físico, con la manera en que surge de ahí la necesidad de nuevas concepciones y la forma en que se construyen puentes para entrar a un nuevo reino de entendimiento. El paradigma clásico dominante en el siglo XIX era la *mecánica*, que en buena medida funcionaba como medio de inteligibilidad de los fenómenos dándoles una visualización espacio-temporal. El escenario sería dicho espacio-tiempo absoluto en el que las partículas materiales interactúan de acuerdo con ciertas leyes que es posible ir desvelando y con las cuales podemos predecir el movimiento de dichas partículas; en suma, un mundo determinístico y continuo. Adicionalmente al pensamiento mecánico podemos identificar dos líneas de pensamiento que habían resultado muy exitosas en el siglo XIX. Por un lado encontramos el *electromagnetismo*, que bajo el concepto de teoría de campos se refiere a estos últimos como entidades independientes de la materia, y

que disputa con la mecánica la posibilidad de reducción última de explicación física del universo: ¿es la radiación una forma de vibración mecánica de un éter que lo llena todo o tiene una existencia independiente? Por otro lado encontramos la *termodinámica*, como ciencia del calor, como paradigma de explicación más fenomenológica, aplicable sólo a variables macroscópicas (presión, volumen, temperatura – de un gas por ejemplo), pero entrando en contacto con la mecánica a través de la mecánica estadística como forma de explicación de las variables termodinámicas en términos del comportamiento promedio de las partículas de un sistema. Las contradicciones y paradojas surgidas en el juego entre estas dos últimas concepciones, al aplicarlas a ciertos fenómenos, como el caso de la radiación del cuerpo negro, dieron lugar a nuevos paradigmas y a la construcción de puentes conceptuales para lograr su asimilación.

Antes de entrar propiamente a los temas cruciales de la física, en el capítulo 1 damos un panorama general de dicha disciplina en tiempos de Ehrenfest haciendo referencia a la crisis vivida, destacando las características que creemos importantes de la labor científica y su relación con el momento cultural y social de su época, y posteriormente, en ese contexto, damos una semblanza de la vida y la labor científica de nuestro protagonista.

La idea del éter aparece de manera natural en la relación entre las concepciones mecánica y electromagnética de la naturaleza. En el capítulo 2 analizamos algunos de los aspectos en torno a la hipótesis del éter, su historia y la crisis en que se encontraba, haciéndolo desde la perspectiva de Paul Ehrenfest, basándonos en su conferencia inaugural de 1912, al asumir el puesto de profesor de física teórica en la Universidad de Leiden en sucesión de Lorentz, y en un artículo del mismo autor donde critica algunos de los puntos de vista de Einstein. En la búsqueda por dar una salida a dicha crisis, la lectura que Ehrenfest hace del tema nos permite recorrer algunas de las ideas de Lorentz, Ritz, Einstein y otros científicos en un momento histórico de cambios conceptuales que transformarían la imagen que tenemos del mundo. Adicionalmente, se analiza el resurgimiento, aunque con otras

propiedades, del éter, siguiendo una conferencia de Einstein que, curiosamente, dictó en la misma Universidad de Leiden, invitado por Ehrenfest, en 1920.

La mecánica estadística, disciplina científica que empezó a desarrollarse a mediados del siglo XIX, presenta dos aspectos que la hacen susceptible de discusiones de carácter filosófico y epistemológico: el uso que hace de la hipótesis atómica y la introducción de nociones probabilísticas. En el capítulo 3 hacemos una revisión de sus orígenes y sus problemáticas basándonos en los escritos de Paul y Tatiana Ehrenfest. En la exposición que ofrecemos, nos detenemos en tres momentos claves: la visión que Paul Ehrenfest tenía de su maestro Boltzmann, expuesta en un obituario escrito en 1906, dos artículos escritos por Paul y Tatiana en 1906 y 1907 donde abordan de una manera penetrante algunas de las incongruencias que presentaba en ese momento la mecánica estadística, y finalmente, un artículo escrito por encargo y que apareció en 1911, en el que presentan el desarrollo de la disciplina, el estado que presentaba en ese momento y las preguntas que faltaba por responder en torno a ella. En esos trabajos, Paul y Tatiana abordan esta materia desde una perspectiva crítica, indicando paradojas y clarificando conceptos, dejando así una huella importante para posteriores investigadores de esa disciplina.

En el capítulo 4 nos referimos al drama cuántico que surge de la convergencia de diferentes ideas en torno a los paradigmas de explicación física mencionados anteriormente. Por un lado encontramos la búsqueda de Planck para esclarecer el concepto de entropía, basándose en la electrodinámica de Maxwell, y por otro la insatisfacción que sentía Einstein en su ideal de visión unificada de la física, al tener que considerar por un lado la existencia de partículas materiales discretas y de un campo continuo por el otro. La crítica y la aportación de Paul Ehrenfest sobre este tema, del cual se ocupó, a diferencia de otros físicos, desde un principio, es un recurso muy valioso para el estudio de los orígenes de la teoría cuántica. En sus escritos sobre el tema, Ehrenfest se ocupa de dilucidar la validez de las analogías y metodologías utilizadas y se preocupa por el carácter de las hipótesis, supuestos y condiciones utilizadas, dándole a sus reflexiones un carácter de interés epistemológico.

La asimilación y maduración de nuevas ideas y conceptos en el campo de la física requirió del establecimiento de vínculos con sus antecesoras antes de poder desprenderse de ellas y formar una nueva estructura totalizadora de comprensión en el campo de estudio de esta disciplina. En el capítulo 5 estudiaremos la forma en que Ehrenfest con su principio adiabático, y Bohr con su principio de correspondencia, tendieron estos puentes entre la visión mecanicista y electromagnética clásica y las nuevas teorías, en un esfuerzo por reconciliar el viejo mundo con el nuevo, en lugar de abocarse simplemente a la mera explotación de una nueva herramienta.

Por último, en el capítulo 6, pero solamente a manera de epílogo, nos referiremos muy brevemente a la génesis de la mecánica cuántica como estructura teórica ya totalmente diferenciada de la física clásica.

Recuento de aportaciones

Como explicábamos al principio de esta introducción, nuestra esperanza es que la presente tesis, aunque de manera modesta, contenga algunos elementos que le den alguna valía como trabajo de investigación.

El lector será el mejor juez, pero consideramos que existen al menos dos aspectos que pueden considerarse como contribución de esta tesis al tema de la historia del surgimiento de la física moderna. El primero de ellos tiene que ver con los elementos que enumeramos arriba como intenciones, en el sentido de dotar a la narración de componentes que destaquen la importancia de las presuposiciones temáticas y del papel de la imaginación en la construcción de las teorías físicas. En segundo lugar, y siendo quizás lo más tangible como aportación, y que con toda seguridad no encontramos en la literatura sobre el tema, es la traducción del alemán al español de algunos trabajos de Paul Ehrenfest, que se encuentran incorporados en los apéndices, y que representan una faceta de la presente tesis que creemos que puede ser muy bienvenida y apreciada dentro de la comunidad de países de habla hispana, en donde el alemán no es un idioma muy difundido.

1 Paul Ehrenfest y la física en su tiempo

Paul Ehrenfest influyó de muy diversas maneras en su disciplina, a la que se dedicó con verdadera pasión. Martin Klein¹ nos hace un retrato fugaz de la contribución de Ehrenfest a la física basándose en una cita de Maxwell² que intenta mostrar a la ciencia como algo vivo en la que no sólo un descubrimiento, sino también la identificación de una paradoja o el uso de una frase científica o la exposición integradora de una teoría son parte de la dinámica y la construcción de la misma. Paul Ehrenfest descubrió lo que más tarde Einstein llamó el principio adiabático, jugó con infinidad de paradojas,³ acuñó el término *catástrofe del ultravioleta*, que con tanto tino exponía una de las limitaciones explicativas de la física clásica, y expuso con maestría, junto con su esposa Tatiana, el estado del arte en que se encontraba la mecánica estadística en la primera década del siglo XX, en un tratado que se convirtió en un clásico y en una referencia obligada para los estudiosos de esa disciplina.

Durante los años en que Ehrenfest fue estudiante, nuevos y sorprendentes desafíos estaban surgiendo en la física. Encontramos, entre otros, el problema de la interacción entre materia y radiación – particularmente el asunto de la radiación de cuerpo negro –, el rompecabezas de los espectros atómicos y moleculares, la teoría del electrón, los rayos X, los fenómenos de radiactividad natural, etc. Estos nuevos fenómenos, aunados al contexto intelectual, cultural, social y político del momento, fueron el caldo de cultivo de una revolución donde la física sufriría una transformación tan o más radical y significativa que la que había ocurrido con

¹ Véase Klein (1981, p. 3).

² La cita textual de Maxwell dice: “It is not by discoveries only, and the registration of them by learned societies, that science is advanced. The true seat of science is not in the volume of transactions, but in the living mind, and the advancement of science consists in the direction of men’s minds into a scientific channel; whether this is done by the announcement of a discovery, the assertion of a paradox, the invention of a scientific phrase, or the exposition of a system of doctrine” (Klein, 1981, p. 3).

³ De los trabajos científicos de Ehrenfest, varios de ellos están centrados en la presentación, formulación o identificación de alguna paradoja resultante dentro de los esquemas teóricos aceptados hasta ese momento dentro de la disciplina de la física. Véase Ehrenfest (1959, pp. 128, 136, 146, 154, 161, 303, 410, 479, 539). Algunos de esos artículos serán analizados con detalle en el presente trabajo.

científicos como Galileo y Newton, y con la que se develaría una nueva forma de entender el mundo y de actuar sobre él, inaugurando nuevas formas de relación más estrechas entre la ciencia y la tecnología. Paul Ehrenfest estaría situado “en el centro del drama de la física contemporánea”, según lo caracterizó Paul Langevin después de su muerte en 1933.⁴ Más aún, como veremos, Ehrenfest viviría ese drama en carne propia, su voz sería una de las más escuchadas y respetadas en su comunidad científica, ejercería gran influencia en colegas y discípulos y, en suma, dejaría una huella importante en la nueva física.

Antes de abordar con mayor detalle en los siguientes capítulos algunos de los temas cruciales en los que estuvo involucrado Paul Ehrenfest, y para poder hacerlo de una forma que haga justicia a la congruencia y continuidad de los desarrollos internos a la propia disciplina, pero que también muestre las diferentes fuerzas externas que guían, o al menos tienen influencia en la actividad científica, deberemos poner en contexto, en este capítulo, cuatro elementos que consideramos importantes. En primer lugar ofreceremos una breve reconstrucción de la situación que prevalecía en la física a finales del siglo XIX, donde encontraremos diferentes concepciones encontradas que llevaron a la crisis que desembocaría en la revolución mencionada. En segundo lugar identificaremos algunos elementos primordiales en la construcción científica, adicionales a los aspectos de carácter empírico y lógico que típicamente se le atribuyen. En tercer lugar intentaremos una descripción del lugar de la ciencia en la civilización europea y más particularmente germana de finales del siglo XIX y principios del XX. Finalmente, daremos una semblanza de Paul Ehrenfest en su labor científica, pero con toda la carga de humanidad que, nos parece, es rescatable en este personaje.

⁴ Véase Klein (1981, p. 3).

1.1 La física en un período de crisis

En 1911, Paul Ehrenfest, durante su periplo por varias ciudades europeas en busca de trabajo, llegó a Praga y ahí conoció por primera vez a Albert Einstein. Muchos años después, Einstein recordaría que en ese encuentro habían conversado sobre el estado que guardaba la ciencia en esos momentos:

Ambos nos habíamos dado cuenta de que la mecánica clásica y la teoría de los campos eléctricos habían fracasado en los fenómenos de la radiación del calor (la teoría estadística del calor), pero no encontramos una solución factible a ese dilema. El vacío lógico de la teoría de la radiación de Planck –que, sin embargo, era objeto de una gran admiración por parte nuestra- nos parecía evidente. También discutimos sobre la teoría de la relatividad, a la que él respondió con cierto escepticismo, pero con el juicio crítico que le caracterizaba. En pocas horas nos hicimos buenos amigos (...) ⁵

Esta nota de Einstein nos revela el estado de la física a principio del siglo XX, en la que se habían desarrollado diversos esquemas conceptuales, entre los cuales existían una serie de tensiones, oposiciones, incompatibilidades. Dado el carácter de Ehrenfest, este estado que presentaba la física le dio amplio material para ejercer su visión crítica, y detectar así diversos problemas fundamentales que surgían en su disciplina, y sobre todo, para identificar conceptos claves, presentarlos de la manera más simple y, sobre eso, erigir cuestionamientos que señalaban de manera certera dónde faltaba la claridad que él tanto anhelaba.

Para entender el trabajo de estos hombres de principios del siglo, es necesario contar primero con una reconstrucción, aunque sea sucinta, de la situación que dio origen a la revolución cuántica. Tres grandes esquemas conceptuales luchaban por ser la base de la explicación física del mundo, el mecanicismo, el electromagnetismo y la termodinámica, cada uno de ellos con sus promotores y sus detractores. Pero además, lo cual complica las cosas, a la vez encontramos oposiciones conceptuales, que en ocasiones caen más en lo heurístico, en el prejuicio, en la preferencia

⁵ Véase el apartado *Paul Ehrenfest in memoriam* en Einstein (1950, p. 215).

filosófica. Nos referimos a aspectos como la dualidad continuidad/discontinuidad, la paradoja reversibilidad/irreversibilidad, la posibilidad de descripciones estáticas y dinámicas, el uso de modelos microscópicos o macroscópicos, etc.

Probablemente el paradigma fundamental de la física del siglo XIX fue el mecanicismo. Para algunos científicos, la inteligibilidad de un fenómeno dependía de la posibilidad de describirlo en términos mecánicos. Sin embargo, a finales del siglo XIX, eso se tradujo en una limitación que tuvo que superarse para poder lograr nuevos resultados y nuevos esquemas de comprensión. Obviamente, esa superación no se dio de la noche a la mañana, sino que se produjo lentamente en el transcurso de las tres últimas décadas de ese siglo. El fundamento del programa de explicación mecánica de la física partía de considerar la existencia de partículas de materia en movimiento como el substrato que yacía bajo la realidad física. Habría un espacio y tiempo absolutos a manera de escenario donde estarían depositadas las partículas materiales, las cuales interactúan entre sí de acuerdo con ciertas leyes que el hombre ha ido descubriendo. Esas leyes, descritas fundamentalmente en términos de ecuaciones diferenciales, y las condiciones iniciales de las partículas, nos permitían predecir su posición y velocidad futuras; el mundo era determinístico y continuo. Por supuesto que es necesario hacer algunas distinciones, pues los físicos usaban la explicación mecánica de diversas maneras.⁶ Para algunos, los fenómenos físicos se explicaban, como dijimos, en términos de partículas a las cuales se les podía rastrear su movimiento continuo en el espacio conociendo las fuerzas que interactuaban entre ellas. Para otros la explicación mecánica implicaba la descripción de modelos hipotéticos que incluían ruedas, resortes, engranes y demás componentes mecánicos para la representación de los fenómenos. Otros más recurrían al formalismo matemático abstracto de la dinámica, etc.

Paralelamente se habían desarrollado las teorías de campo, pensado éste como poseedor de un status diferente e independiente de la materia, a partir de los trabajos de Faraday y culminando con la teoría electromagnética de Maxwell que ofrecía una alternativa seria al mecanicismo. Sin embargo, Maxwell había mostrado que las

⁶ Véase por ejemplo Harman (1990, p. 23).

ecuaciones del campo electromagnético se podían ver como las ecuaciones de un sistema mecánico:

Lo que propongo hacer ahora es examinar las consecuencias de la suposición de que los fenómenos de la corriente eléctrica corresponden a los de un sistema en movimiento, donde dicho movimiento se comunica de una parte del sistema a otra por medio de fuerzas, cuya naturaleza y leyes aún no intentamos definir porque podemos eliminar estas fuerzas de las ecuaciones del movimiento usando el método dado por Lagrange para cualquier sistema conectado (...) ⁷

pero dejaba en claro que no se debía confundir representación con realidad. Podría uno imaginarse múltiples representaciones mecánicas equivalentes:

El intento de imaginar un modelo de este mecanismo no debe llevarse más allá de lo que es, una demostración de que es posible imaginar un mecanismo capaz de producir una conexión mecánicamente equivalente a la conexión real de las partes del campo electromagnético (...) ⁸

En todo caso se trataba de describir fenómenos, en los que no intervenía materia ponderable, en los mismos términos en que se describían los fenómenos de la materia ordinaria; habría una sustancia llamada éter, que llena todo el espacio y que se encuentra en reposo absoluto, a través del cual se transmitirían los efectos eléctricos y magnéticos. Algunos físicos, como por ejemplo Wilhelm Wien y Max Abraham, no necesariamente interpretaban estas relaciones como una prueba de la visión mecánica de la naturaleza, sino que consideraban que, con igual justificación, se podía considerar lo contrario, es decir, que los movimientos de los cuerpos obedecían las leyes de la electrodinámica, viendo así al electromagnetismo como el fundamento de la mecánica. ⁹

Un tercer esquema conceptual, con raíces más asentadas en la descripción fenomenológica, era la termodinámica o ciencia del calor, basada en los principios generales de la conservación de la energía (primera ley) y del incremento de la

⁷ Véase Maxwell (1873/1954, p. 198).

⁸ Ibid., p. 470.

⁹ Véase Jungnickel & McCormach (1990, p. 228).

entropía (segunda ley). La teoría evitaba el uso de entidades teóricas dudosas (no había éter, no había átomos) y por lo tanto, para algunos se perfilaba como la mejor manera de describir los fenómenos físicos. La segunda ley implicaba la existencia de fenómenos irreversibles incompatibles con las descripciones mecánicas y electromagnéticas del mundo físico. En estas últimas, si un sistema cambia de un estado X a un estado Y, y luego se invierten las velocidades de todas las partículas del sistema y la dirección de las corrientes y de los campos eléctricos y magnéticos, el sistema invertiría también su evolución regresando de nuevo a su estado inicial X. Ante esta aparente incompatibilidad, algunos científicos, entre los que destaca de manera especial Ludwig Boltzmann, se dieron a la tarea de mostrar que no existía tal desacuerdo e intentaron explicar la segunda ley de la termodinámica en términos mecánicos derrochando gran ingenio para modificar el planteamiento mecánico clásico para que tal reducción fuera posible. El punto de partida fue la descripción atómica de la materia y la introducción del análisis estadístico para describir el comportamiento de un sistema formado por una gran cantidad de elementos. Este intento de convertir la termodinámica en una rama de la mecánica a través del modelo atómico-molecular de la materia tuvo más éxito que los intentos correspondientes de hacer lo mismo con el electromagnetismo. Sin embargo muchos físicos fueron renuentes y poco entusiastas de dicho planteamiento.

Decíamos en un párrafo anterior que para algunos científicos, el criterio de inteligibilidad de un fenómeno físico consistía en la posibilidad de describirlo en términos mecánicos. Otro criterio de inteligibilidad muy socorrido era el de la causalidad. Como lo dictaba la sentencia de Laplace: “dadme las condiciones actuales del mundo y predeciré el futuro”.¹⁰ En principio, dejando a un lado las dificultades de cálculo matemático, el mundo físico está completamente

¹⁰ Esta concepción laplaciana está asociada, por supuesto, a una idea de causa y efecto en el tiempo. Dado un corte transversal de todo cuanto existe en un instante de tiempo, se tendría la posibilidad de conocer las condiciones de un estado posterior (el efecto) o anterior (la causa). Es la eliminación de todas las causas aristotélicas, con excepción de la causa eficiente, siendo ésta la sobreviviente de una forma racional de mirar al mundo que utiliza dichos esquemas causales como “guía de observación y experimentación” (Ferreiros & Ordóñez, 2002, pp. 56-57). Se trata de una forma utilitaria del conocimiento, pues en ella se basa la posibilidad de predecir y por lo tanto de controlar.

predeterminado.¹¹ Este sentido fuerte de causalidad se iría diluyendo, primero con la introducción del análisis estadístico y posteriormente con el abandono total del paradigma mecánico en la nueva física.

Pero regresando a los tres esquemas conceptuales, el mecanicismo, el electromagnetismo y la termodinámica, diremos que mantuvieron por algún tiempo una fuerte oposición.¹² Como ya se mencionó, Boltzmann intentó reconciliar la termodinámica con la mecánica por medio de la teoría cinética de los gases, que lo llevó a fundar la mecánica estadística. Boltzmann vio en la entropía una medida del desorden, haciendo de la segunda ley de la termodinámica una expresión directa de las leyes de la probabilidad. La disminución de la entropía ya no era una prohibición dentro de las leyes físicas sino simplemente un evento improbable, dependiente de las condiciones iniciales del sistema. Los problemas epistemológicos que esta situación presentó no se pueden soslayar, pues a pesar de reconocer la acción de leyes mecánicas determinísticas, al final se advierte el carácter más débil, probabilístico, de la descripción macroscópica de un sistema compuesto por una multitud de partículas microscópicas. De la misma manera, Planck intentó reconciliar la termodinámica y el electromagnetismo por medio de la teoría de la radiación térmica. Para Planck, una demostración de la segunda ley implicaba mostrar el carácter inevitable de la irreversibilidad, y pensó que tal cosa podía derivarla combinando la termodinámica y el electromagnetismo. El “laboratorio” de trabajo para este intento fue la radiación del cuerpo negro. Su propósito era mostrar que las ecuaciones reversibles de la teoría electromagnética de Maxwell se podían usar para explicar la irreversibilidad de los procesos de radiación. No logró su cometido, y al final, tuvo que recurrir, igual que Boltzmann, a consideraciones probabilísticas. Por otro lado, el desacuerdo entre la mecánica y la electrodinámica fue señalado por Einstein para quien era esencial rescatar la unidad de la visión física del mundo. Por

¹¹ En realidad esta forma de causalidad usada por las ciencias físicas a que hacemos referencia aquí, es la que lleva al determinismo estricto, pero dentro de la visión científica del mundo, han existido concepciones distintas de causalidad. Por un lado versiones más débiles, por ejemplo aquella que entiende la causalidad simplemente como noción de obediencia a leyes. Pero por otro lado se llegaron a usar incluso sentidos más fuertes de la causalidad, por ejemplo la conformidad a leyes mecánicas, a la visualización espacio-temporal, a la descripción por medio de ecuaciones diferenciales, etc. (Forman, 1971/1984, pp. 107-108).

¹² Véase por ejemplo Roy (2002).

un lado, las ecuaciones del movimiento de Newton mantenían su validez para todos los marcos de referencia que se mueven entre sí a velocidad uniforme. No existe, por tanto, un marco de referencia preferencial. En el electromagnetismo sí lo hay, y es el éter que se encuentra en reposo absoluto. Los cuerpos que se mueven a través del éter sufrirían contracciones de acuerdo con las transformaciones de Lorentz. Einstein unificó la mecánica y la electrodinámica con su teoría especial de la relatividad.¹³ Adicionalmente a esto, Einstein advertía una falta de simetría al tener que tratar por un lado con partículas discretas en la mecánica, y por otro lado ondas continuas en el electromagnetismo. Sugirió que se debería de explorar la idea de que la luz tenga también un comportamiento discreto, es decir, como una colección de partículas de energía localizadas e independientes entre sí, de manera similar a como un gas está conformado por partículas (moléculas) discretas.¹⁴ Al final, fue la presencia simultánea de estos tres esquemas conceptuales los que delinearon el nacimiento de la novedad cuántica en física a través del estudio de la radiación del cuerpo negro en el que tanto empeño puso Planck.

Evidentemente una de las tradiciones científicas que echaron raíces en el siglo XIX fue la concerniente a la investigación de la constitución íntima de la materia. Para quienes abogaban en pro de la teoría atomística de la materia, la tarea de deducir la estructura interna de los átomos fue una labor que finalmente no pudo resolverse del todo en el marco de la física del siglo XIX, es decir, con las bases conceptuales de los tres esquemas paradigmáticos a los que nos hemos referido. Poco a poco fue quedando claro que una comprensión de las leyes básicas de la física que rigen los aspectos microscópicos del mundo, no es equivalente a la comprensión de los fenómenos a escala humana o de los fenómenos de la experiencia diaria. El tamaño extremadamente pequeño de los constituyentes básicos de la materia es tal que no podemos obtener una imagen de ellos a partir del mundo macroscópico o viceversa.

¹³ En su artículo *Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento* del año 1905, Einstein comienza advirtiendo precisamente que la aplicación de la electrodinámica de Maxwell a cuerpos en movimiento “conduce a asimetrías que no parecen ser inherentes a los fenómenos” y se propone desarrollar “una electrodinámica de cuerpos en movimiento simple y consistente basada en la teoría de Maxwell para cuerpos en reposo” (Stachel, 2001, p. 111 y 112).

¹⁴ Véase el artículo de Einstein *Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz*, *Ibid*, pp. 161-178.

Hay jerarquías de estructuras, de manera que conceptos diferentes se aplican a cada nivel. Lo más que se puede hacer es tender puentes entre ambos mundos. Esos puentes se empezaron a construir en las últimas décadas del siglo XIX.

Si consideramos como física clásica aquella que describe al mundo inanimado regido por las leyes mecánicas de Newton, las del electromagnetismo de Maxwell y las de la termodinámica, veremos que es una imagen suficientemente adecuada para la comprensión de muchos de los fenómenos físicos encontrados en la vida diaria y que además permitió el desarrollo de una incipiente industria tecnológica. Sin embargo, una inspección más cercana mostraría las incapacidades de la física clásica. No explica por ejemplo por qué brilla el sol, por qué algunas sustancias son buenas conductoras de la electricidad en tanto que otras son aislantes, etc.¹⁵ Sin embargo, la mayoría de los físicos de finales del siglo albergaban la esperanza de que a la explicación física del mundo, basada en la mecánica, la termodinámica y el electromagnetismo, sólo le faltasen retoques y detalles menores y se llegara así a la culminación de la ciencia en donde se agotaría el conocimiento de la naturaleza, donde ya no habría nada más que conocer. Quienes así pensaban, se encontraban verdaderamente lejos de la verdad y no imaginaban la revolución que se avecinaba. Lejos de que esto sucediera, se empezó a acumular el conocimiento de nuevos fenómenos que no cabían en el contexto de los esquemas teóricos de la física conocida y que fueron haciendo evidente el hecho de que el edificio de la física clásica se tambaleaba. El mismo William Thomson (lord Kelvin), uno de los personajes más representativos del éxito de la física del siglo XIX, habló de la existencia de “nubes en el horizonte” que se presentaban como obstáculos a la, por lo demás, exitosa ciencia física de finales del siglo.

Los últimos años del siglo XIX se vieron marcados por nuevos y sorprendentes descubrimientos experimentales que representarían un gran desafío para lograr hacerlos encajar en un marco teórico. En 1895, trabajando con descargas eléctricas en tubos al vacío, Röntgen había reportado la existencia de una nueva forma de radiación muy penetrante, los rayos X, cuya naturaleza resultaba

¹⁵ Véase Pais (1991, p. 66)

problemática. J. J. Thomson confirmaba en 1897 el carácter corpuscular de los rayos catódicos. En 1896 Becquerel mostraba la existencia de otras formas de radiación emitidas por sales de uranio. En fin, se abría para los científicos un abanico de nuevos efectos que tarde o temprano tendrían que ser explicados teóricamente, lo cual ciertamente no sucedería dentro de las fronteras de la física clásica, pues exigirían la necesidad de un rompimiento con sus esquemas.

1.2 Física: experiencia, teoría e imaginación

Albert Einstein, quien además de ser uno de los más grandes físicos de todos los tiempos poseía también un profundo interés filosófico, expresó en diversas ocasiones sus ideas en torno a lo que es constitutivo de la ciencia. Por ejemplo, en el libro *La física, aventura del pensamiento*, que escribió junto con Leopold Infeld, mostraba sus convicciones filosóficas diciendo:

La ciencia no es sólo una colección de leyes, un catálogo de hechos sin mutua relación. Es una creación del espíritu humano con sus ideas y conceptos libremente inventados. Las teorías físicas tratan de dar una imagen de la realidad y de establecer su relación con el amplio mundo de las impresiones sensoriales. Luego, la única justificación de nuestras estructuras mentales está en el grado y en la norma en que las teorías logren dicha relación.¹⁶

Einstein se refiere aquí claramente a que el objetivo de la ciencia es proporcionar imágenes de la realidad que concuerden o sean compatibles con lo que captan nuestros sentidos, pero a estas imágenes, según su apreciación, se llega primero gracias a un ejercicio de la libertad. Así, la ciencia se puede nutrir de la diversidad de “esquemas de pensamiento, cuya selección se encuentra en principio abierta a nosotros, y cuya pertinencia sólo puede ser juzgada por el grado en que su uso contribuya a hacer «inteligible» la totalidad de los contenidos de la conciencia”.¹⁷ Más que un cuerpo de conocimiento restringido solamente a sus

¹⁶ Véase Einstein & Infeld (1958, p. 249).

¹⁷ Véase Einstein (1970b, p. 673).

dimensiones lógica y empírica, la ciencia necesita además de elementos adicionales, como pueden ser el uso de metáforas, la aplicación de experimentos mentales, la guía de ciertas condicionantes filosóficas, metodológicas o temáticas, etc.

A manera de ejemplo, sobre el cual se profundizará en el capítulo 2, en la tentativa de entender una gran diversidad de fenómenos físicos, los científicos se vieron en la necesidad de imaginar la existencia de un éter que llenaba el espacio y que era el responsable de la transmisión de efectos eléctricos, magnéticos, lumínicos, etc. El uso de esta guía temática dio grandes frutos a pesar de que al final se tuvo que abandonar. Ehrenfest fue uno de quienes, de una manera brillante, en su conferencia inaugural en Leiden en 1912, dio cuenta de las diversas luchas personales que se habían venido dando en torno a este concepto a finales del siglo XIX y principios del XX, evento que tendremos oportunidad de abordar con detalle más adelante.

La reducción de la ciencia a su dimensión fenoménica y su estructura lógico/analítica, aunque útil sobre todo en el contexto de justificación del conocimiento científico, esconde mucho de lo que es la verdadera actividad científica, de su dinámica y del papel que juegan los aspectos estéticos y motivacionales en los procesos de creación de teorías. Por eso en este espacio queremos poner en su justa perspectiva tanto esa imagen fría y sin vida que a veces encontramos en la percepción pública de la ciencia, y que además en muchas ocasiones ha sido el centro del debate filosófico, como también la que nos muestra a la ciencia con los espacios necesarios para el juego creativo de la intuición y los intereses personales. El análisis que haremos posteriormente del trabajo y el pensamiento de Paul Ehrenfest sobre los temas cruciales de la física de su tiempo lo sustentaremos, entre otras cosas, en los elementos plasmados en esta sección.

1.2.1 Teoría, experimento y filosofía de la ciencia

La física, como ciencia natural, es una actividad humana en busca de conocimiento avalado fundamentalmente en la evidencia experimental y en procesos de discusión

crítica y racional y de elaboración de teorías. Muchas corrientes de la filosofía de la ciencia han destacado de manera preponderante la teoría y han centrado sus intereses en saber cómo se cambia de teoría, qué significa reducir una teoría a otra, cómo se evalúan y se comparan entre sí las teorías, etc. Muchas de estas discusiones las encontramos en estudiosos de la filosofía de la ciencia del último siglo.

La filosofía de la ciencia del siglo XX ha dado lugar a diferentes corrientes de pensamiento. Dado el éxito que había tenido la ciencia y su progreso en la generación de conocimiento y de productos tecnológicos, se quiso elevar a la categoría de conocimiento seguro alrededor de la década de los 20's. Surgió el positivismo lógico, con el círculo de Viena, que buscó fundamentar sobre bases totalmente firmes la generación del conocimiento científico. El proyecto fracasó y dio lugar a nuevas interpretaciones principalmente en la segunda mitad del siglo XX que pusieron en duda algunas características normalmente atribuibles a la ciencia, como su objetividad, su carácter acumulativo, su unidad metodológica, etc. En estos procesos de reflexión, aunque han participado muchos filósofos, han destacado de manera especial algunos pensadores, entre ellos Karl Popper, Thomas S. Kuhn, Imre Lakatos, etc. Veremos en seguida el origen y las propuestas de algunos de estos filósofos.

Desde tiempos de René Descartes y de Francis Bacon, uno de los aspectos primordiales de la reflexión sobre la actividad científica ha sido el establecimiento de un criterio de demarcación, que nos identifique lo que es ciencia de lo que no lo es. La visión original, que sigue siendo muy popular hoy en día, consiste en considerar que el conocimiento científico procede de las instancias particulares a las generales por medio de la inducción. Esto nos lleva al criterio de verificabilidad, que considera como enunciados científicos sólo aquellos obtenidos a partir de hechos observables y que por lo tanto pueden ser verificados por la experiencia.

A pesar de los obvios problemas que presenta este criterio de demarcación,¹⁸ hubo muchos esfuerzos por salvarlo a través de construcciones lógicas, criterios

¹⁸ Después de todo, por ejemplo, ningún número de enunciados observacionales podría conducir de manera *lógica* a un enunciado general, como ya señaló Hume en el siglo XVIII.

probabilísticos, etc. Pero fue Karl Popper quien propuso una solución más radical al problema de la inducción con su principio de falsación.¹⁹ Para Popper no se pueden verificar los enunciados generales, es decir, no se pueden probar, pero sí se pueden falsar. Esto desde luego lleva a una situación un tanto incómoda, en el sentido de que no hay nada de lo que se pueda decir si es verdadero; sólo se puede decir si es falso. Así pues el criterio de demarcación para Popper consistiría en decir que sólo los enunciados que son falsables (al menos en principio) se pueden considerar como científicos.²⁰

Sin duda fue el libro *La estructura de las revoluciones científicas* de Thomas S. Kuhn el que inició un replanteamiento en relación con la forma en que ha de entenderse la actividad científica.²¹ Para Kuhn, el progreso en la ciencia está determinado por el establecimiento de paradigmas. Un paradigma es una visión aceptada por un grupo de científicos que trabajan resolviendo problemas basados en ese paradigma en lo que Kuhn llama “ciencia normal”. Cuando se acumulan “anomalías” que no pueden ser explicadas con las teorías aceptadas, surgen nuevas ideas que compiten entre sí. Al prevalecer una de ellas surge un nuevo paradigma y un nuevo período de ciencia normal. De esta manera el conocimiento científico no crece gradualmente sino por saltos. En estos procesos revolucionarios o de cambio entran en juego presiones sociales, aspectos psicológicos, etc. Para Kuhn la transformación de la ciencia no se puede explicar sólo por la ciencia misma, sino por su contexto social y cultural.

Otra visión que engloba algo de las propuestas de Popper y de Kuhn es la de Imre Lakatos.²² La filosofía de la ciencia de Lakatos acepta el principio de falsación de Popper, pero no en su forma ingenua de considerar que una teoría puede ser falsada por un solo enunciado observacional. En su lugar introduce el “falsacionismo sofisticado”, el cual expresa que una teoría o un programa de investigación (el

¹⁹ Véase Popper (1991).

²⁰ La labor científica consistiría en proponer continuamente nuevas y aventuradas teorías. Mientras más improbables sean, mejor. Las teorías falsadas serían sustituidas por nuevas y mejores teorías y de esa manera se asegura el progreso científico.

²¹ Véase Kuhn (1962/1970).

²² Véase Lakatos (2002).

equivalente al paradigma de Kuhn) sólo puede ser falsado proponiendo una nueva teoría que sea más completa, en el sentido de explicar cosas que la anterior teoría no explicaba, y de predecir nuevos hechos, es decir, de tener un exceso de contenido empírico en comparación con la teoría anterior.

Todas estas propuestas han aportado, por supuesto, elementos valiosos para la reflexión filosófica, pero hay quienes consideran que ha habido una tendencia exagerada a privilegiar los aspectos teóricos del conocimiento sobre otros de sus rasgos, sobre todo el referente a la experimentación. Ian Hacking critica que los filósofos de la ciencia han centrado su discusión en torno a las teorías y la representación de la realidad y sugiere que desde un punto de vista filosófico, se le debe prestar más atención a la ciencia experimental.²³ La “miseria del teoreticismo”²⁴ consistiría precisamente en limitar la riqueza y la complejidad de la actividad científica a una serie de procesos de mera elaboración conceptual sin darle el lugar que merece a la experimentación. Esta “tradición teoreticista” de la filosofía de la ciencia es quizás explicable si pensamos que la física fue en buena medida la ciencia natural de la que surgieron los modelos a seguir del método científico y que esa ciencia sufrió una escisión a mediados del siglo XIX, surgiendo la física teórica como una subdisciplina en buena medida autónoma dentro de la comunidad de los físicos. No profundizaremos más en este aspecto pero nos parece pertinente mencionarlo aquí dado que el protagonista central de esta tesis, Paul Ehrenfest, es precisamente un físico fundamentalmente teórico.

1.2.2 Elementos para entender la actividad científica

Para entender la actividad científica, sería fundamental entonces evitar caer en radicalismos y procurar entonces darle a las diferentes dimensiones de la misma, su justo reconocimiento. La visión de Gerald Holton²⁵ nos parece que es muy

²³ Véase Hacking (1996, p. 177-178).

²⁴ Expresión usada por Ferreiros & Ordoñez (2002, p. 53).

²⁵ Véase por ejemplo el capítulo 5 de *Einstein, historia y otras pasiones* (Holton, 1998a, pp. 143-164) o el capítulo 1 de *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein* (Holton, 1982, pp. 19-42).

equilibrada en este sentido. Él está de acuerdo con Kuhn en privilegiar el contexto de descubrimiento, pues eso es lo que nos dirá en qué consiste la actividad científica, en vez de hablar solamente de los productos finales. Para entender un suceso en la historia de la ciencia, Holton propone un análisis multidimensional que nos brindaría una explicación completa del mismo. Digamos que le llamamos suceso E y que ocurre en el tiempo t .²⁶ Los puntos que incluiría dicho análisis son:

1. Se debe hacer un inventario del estado contemporáneo del conocimiento científico público y compartido del tema en el tiempo t . Es decir, con esto tendríamos el establecimiento del estado histórico y públicamente disponible de la ciencia en t .

2. Enseguida se necesita establecer la trayectoria temporal del estado del conocimiento científico público que lleva hasta el instante t y que se prolonga más adelante. En este punto el suceso E es visto como un punto en esta trayectoria temporal.

3. Lo hecho en el punto 1 anterior en relación con el estado del conocimiento científico público de la época, se debe hacer ahora para el estado del conocimiento “privado” de los individuos relacionados con el suceso E . Hablamos ahora de los aspectos más personales de la actividad científica. Esto es fundamental para establecer lo que llamamos el contexto de descubrimiento.

4. Igual que en el punto 2, se debe de establecer la trayectoria temporal, pero ahora del conocimiento privado. Ambas trayectorias se verán intersectadas en el punto o suceso E , y se estará ahora en posibilidad de analizar la interacción entre ambas trayectorias.

5. Se debe de tomar en cuenta el desarrollo biográfico (no científico) de los científicos involucrados en el suceso E .

²⁶ Por ejemplo un suceso podría ser una carta o un artículo escrito por un científico o la construcción de algún dispositivo.

6. También se debe establecer cuál es el escenario social. Es decir, tenemos otro elemento que considera la función de la ciencia en la época correspondiente, así como el estado de la profesión científica, los efectos del sistema educativo, etc.

7. No debe quedar fuera la consideración de los desarrollos culturales fuera de la ciencia, así como los sucesos políticos o corrientes ideológicas que influyeron en el trabajo de los científicos.

8. El análisis del suceso histórico se entenderá mejor si tomamos en cuenta la estructura epistemológica y lógica de la obra que está en estudio. En este punto es donde tienen mayor relevancia los aspectos de filosofía de la ciencia a los que nos referimos anteriormente.

Estos ocho elementos de análisis no son, por supuesto, excluyentes ni independientes, y la riqueza que se pueda encontrar en un caso de estudio dependerá de la sutileza con que se puedan interrelacionar de tal manera que en conjunto proporcionen un mejor entendimiento de los desarrollos científicos.

Sin embargo, aún con todo el entendimiento que todos estos recursos analíticos nos pueda proporcionar, Holton considera que es indispensable un noveno elemento que tome en cuenta la importancia de la imaginación en la ciencia. Dentro de este punto, es posible tener en consideración, por ejemplo, el papel de diferentes figuras imaginativas como podría ser la metáfora o la analogía, pero Holton hace mayor hincapié en lo que él llama el análisis de las presuposiciones *temáticas* del hombre de ciencia individual que mueven y guían su investigación. Estos elementos temáticos representan el aspecto de carácter más subjetivo, el que lleva una mayor carga de prejuicio en el trabajo del científico, pero que Holton considera que es esencial y del cual nos ocuparemos más adelante.

1.2.3 El papel de la imaginación en la ciencia

Si pensamos en la ciencia y en su aparente exigencia de no dejarse tentar por lo que no sea la observación y la percepción directa, clara e indubitable de los fenómenos, tendría que rechazarse la imaginación como recurso de conocimiento. Sin embargo, la verdad es que la imaginación siempre ha jugado un papel fundamental en la ciencia y más aún cuando el ser humano, en busca de conocimiento, empezó a adentrarse en el estudio del microcosmos donde el objeto de estudio evidentemente se aleja de la experiencia sensible y directa y por lo tanto entra en un mundo de entidades y efectos que no se ven, lo cual implica que el factor imaginación toma una importancia especial que brinda la capacidad para elaborar modelos coherentes con posibilidad de dar explicaciones.

El factor imaginación nos permite probablemente sacar a relucir aspectos comunes entre las artes y las ciencias, los cuales ciertamente existen pues “el ingenio y la pasión que hay detrás de las dos empresas son similares”, pero también se deben advertir las diferencias, pues “los objetivos, las herramientas y los productos difieren”.²⁷ Los siguientes párrafos nos permiten focalizar más el uso de la imaginación en la producción científica:

La imaginación (...) se sitúa justamente en el confín entre el mundo interno y la realidad externa. No es utilizada, como el fantasear, para satisfacer de forma omnipotente y alucinatoria deseos e impulsos afectivos, sino para construir una hipótesis de interpretación del mundo y un proyecto de acción sobre la realidad.

No sirve para renegar de la realidad y para construir un mundo «como si», sino para explorar posibilidades. Se elaboran mundos alternativos para verificar qué tipos de consecuencias hubieran entrañado ciertos sucesos, qué «habría ocurrido si»; se trata de fantasías «experimentales», de pensamientos

²⁷ Véase Holton (1998a, p. 111).

preverbales, Fenómenos que tienen que ver con el juego y con la manipulación orientada a un fin de la realidad.²⁸

Las formas que toma este tipo de elaboración pueden ser variadas, pero aquí nos referiremos particularmente al uso de la metáfora y al uso de la imaginación temática, que consideramos de gran valor en el análisis histórico de los desarrollos científicos.

1.2.3.1 La metáfora

La complejidad del fenómeno del conocimiento no puede definirse exclusivamente en términos de la aplicación de procesos racionales en sentido cartesiano. El trabajo del científico no se da de manera aislada e independiente de otras esferas de su vida y la correspondiente carga de preconcepciones mentales que acarrea. La posibilidad de entender un nuevo fenómeno presupone experiencias previas de vida por medio de las cuales se puede recurrir a algo previamente comprendido o asimilado desde lo cual se puede hacer una transferencia de significados. En este sentido, una herramienta utilizada con frecuencia por los científicos es la metáfora.

La metáfora la podemos considerar como la base de un modo primordial de conocimiento que consiste en ver «algo» como si fuera otra cosa y que “desempeña un papel esencial en el establecimiento de conexiones entre el lenguaje científico y el mundo”.²⁹ Así es como, por ejemplo, vemos un átomo como si fuera un sistema planetario, vemos la luz como un fenómeno ondulatorio similar a las ondas producidas en un estanque al arrojar una piedra, etc.

Desde luego, la metáfora es una herramienta que los científicos utilizan sobre todo en la génesis de sus ideas, donde por lo general es mayor esa lucha personal por encontrar la luz, por llegar a principios explicativos en un camino que a veces resulta

²⁸ Véase Preta (1993, pp. 16-17).

²⁹ Véase Kuhn (2002, p. 241).

verdaderamente dramático y conflictivo; las metáforas describen estados nacientes, todavía no bien determinados y expresados.³⁰

La metáfora sirve varias funciones y tiene sus riesgos y sus límites. La metáfora tiene una función primordialmente creativa durante la fase naciente de la imaginación científica, pero también hay momentos de urgencia por encontrar analogías, metáforas o símiles con el objetivo de simplificar y unificar varias ramas de una ciencia y por lo tanto siempre están activas en el trasfondo de la investigación científica. En ocasiones, la metáfora deja de cumplir su función y se abandona, dando paso a una mayor formalidad lógica de la teoría en cuestión, como cuando muchos científicos decidieron abandonar las visualizaciones mecánicas del campo electromagnético y establecer que la formalización matemática era todo lo que requería la teoría.

Las metáforas en la ciencia pueden actuar de dos formas distintas, dependiendo de cómo se usen. Pueden actuar a manera de puente, como transferencia de significados en contextos diferentes. Pero también pueden aparecer como herramienta más activa de cambio, de transformación, en el proceso de reestructuración de algún aspecto de la visión del mundo. Pero en cualquier caso, su acción es en general más o menos efímera por su dependencia de los contextos donde actúa. En cambio, a diferencia de las metáforas hay otros elementos que perduran y que aparecen como el centro temático de las metáforas. Estos centros temáticos operan a un nivel de estructura y sirven para dotar a las versiones sucesivas de las metáforas de un significado recuperable a pesar de los cambios o transformaciones.³¹ En la siguiente sección profundizaremos más sobre este aspecto de la imaginación científica.

³⁰ Véase Holton (1998a, pp. 130-132).

³¹ En un ejemplo que usa Holton se nos dice que la secuencia de círculos, excéntricas, elipses y demás figuras, para explicar los movimientos planetarios, son variaciones de un mismo «tema», en este caso la eficacia de la explicación geométrica. Otro ejemplo sería el que tiene que ver con los conceptos temáticos duales de continuo-discreto; las imágenes y metáforas que ha suscitado la idea de la constitución discreta o atómica de la materia han cambiado una y otra vez desde los tiempos de Demócrito, pero el «tema» central de la constitución discontinua ha perdurado.

1.2.3.2 La imaginación temática.

Como ya lo señalábamos anteriormente, a nadie sorprende la idea de que en el trabajo científico hay dos elementos constitutivos que lo caracterizan: su contenido empírico y su contenido analítico. Por lo tanto, diríamos en términos generales que en la actividad científica se obtienen leyes a partir de la generalización de enunciados observacionales; aquí la experiencia, o conocimiento a través de los sentidos, es la base del conocimiento científico. Pero también tenemos los aspectos de carácter lógico y matemático; una ciencia se construye a través de un cuerpo de axiomas, teoremas, corolarios que le dan esa estructura lógica. Así pues, habrá resultados científicos derivados de la experiencia y otros que serán lógicamente necesarios.

Gerald Holton ubica estas dos dimensiones de la ciencia como si fueran los ejes x y y de un plano. Las filosofías de la ciencia arraigadas en el empirismo o el positivismo establecen que toda ciencia significativa se efectúa en este plano x - y . Por ejemplo, si tomamos el concepto de fuerza, encontramos que tiene un componente empírico porque es algo que se puede medir por medio, por ejemplo, de la deformación observable de cuerpos sólidos, y también tiene un componente analítico que en este caso correspondería al uso de las matemáticas del cálculo vectorial.³² Sin embargo resulta claro en la manifestación de muchos científicos que estos elementos no pueden describir de una manera completa la actividad científica. Luis de Broglie y Albert Einstein lo expresaban así:

Las personas que no tienen la práctica de las ciencias se imaginan muy a menudo que éstas nos proporcionan siempre *certitudes* absolutas; dichas personas se representan a los investigadores científicos basando sus deducciones en hechos indiscutibles y en razonamientos irrefutables (...) Sin embargo, el espectáculo de la Ciencia actual, así como la historia de las Ciencias en el pasado, nos prueban que no sucede así (...) ³³

La ciencia, como algo existente y completo, es la cosa más objetiva que el hombre conoce. Pero, la ciencia en su hechura, como un propósito a cumplir, es

³² Véase Holton (1993, p. 315).

³³ De Broglie, citado en Moya (1998, p. 41).

tan subjetiva y tan condicionada psicológicamente como cualquier otra rama del esfuerzo humano (...) ³⁴

Para entender la manera en que trabaja la mentalidad científica tomando en cuenta estos aspectos subjetivos, Holton sugiere distinguir entre ciencia pública y ciencia privada. Ciencia pública es la que encontramos en los libros de texto, es decir, es el conocimiento ya aceptado por la comunidad científica; sería la ciencia como institución. Por otro lado, la ciencia privada correspondería precisamente a la que se da en ese modo de descubrimiento del que habíamos hablado anteriormente. Corresponde a ese proceso de lucha personal del que hablaba Einstein y que se da en las primeras etapas del desarrollo de ideas nuevas. Poco a poco ese estado privado del conocimiento científico es superado y se formaliza para pasar a formar parte del acervo científico de la ciencia pública.³⁵

En esta fase naciente del conocimiento científico (ciencia privada) es necesario hacer referencia al contenido *temático* de la ciencia. Holton lo visualiza como una componente ortogonal al plano x - y y que complementa los aspectos empíricos y analíticos de la ciencia. Esta dimensión de los «temas» se refiere a aquellas presuposiciones que no pueden ser directamente confirmadas o descartadas, que no provienen de los datos de observación o de la teoría, sino que son impuestos desde fuera y aceptados explícita o implícitamente.³⁶ Este aspecto representa por un lado un peligro para la objetividad del conocimiento científico, pero por otro lado es un componente fundamental e inevitable sin el cual el avance científico se vería paralizado.

En este análisis *temático*, Holton nos dice que hay un número pequeño de «temas» que han jugado un papel preponderante en los principales descubrimientos en la historia de la ciencia. Estos «temas» pueden aparecer en términos antitéticos (por ejemplo: atomismo/continuidad, complejidad/simplicidad, reduccionismo/holismo, unidad/niveles jerárquicos, causalidad/probabilismo,

³⁴ Einstein, citado en Bernal (1989, p. 40).

³⁵ Véase Holton (1993, pp. 277-278).

³⁶ Véase Holton (2003, p. 3).

principios causales/principios teleológicos, análisis/síntesis) o no, pero en todo caso son elementos que trascienden las revoluciones científicas y en ellos podemos incluir los siguientes ejemplos: búsqueda de principios de conservación, el carácter matemático de la explicación científica, simetría, principios de unidad, evolución, acción a distancia, medios que llenan el espacio, mecanismos ocultos, los absolutos de espacio y tiempo, ciclos vitales, etc. Es claro que los «temas» no se prueban ni se refutan, sino que sólo sirven de guía al proceso de creación científica y son especialmente útiles cuando una ciencia es joven y por tanto no ha elaborado el complejo sistema lógico y analítico que posteriormente la sostendrá en su modo de justificación.

El progreso de la ciencia puede muy bien depender de un correcto *balance* entre la diversidad en el espectro de «temas» que son aceptados a título personal por científicos en un momento dado y la existencia de grupos de «temas» compartidos por esos mismos científicos. Así, por ejemplo, la preocupación *temática* por una imagen unificada del mundo sostenida por algunos, no conduciría a un “desastre totalitario”³⁷ ni tampoco a una dispersión anárquica de los esfuerzos de la comunidad científica o a una trayectoria aleatoria y sin progreso. En este sentido, las innovaciones pueden surgir de este *balance*, sin que se requiera de parte de los científicos individuales o de la comunidad científica una reorientación radical de carácter revolucionaria. Este balance explicaría “por qué el progreso científico es en ocasiones desordenado, pero no catastrófico; por qué hay muchos errores y engaños, pero no una gran falacia; y cómo es que simples seres humanos, confrontando los aparentemente infinitos rompecabezas e interconexiones del universo, pueden, sin embargo, avanzar”.³⁸

Resaltar esta dimensión de los «temas», como adicional a los aspectos empírico y lógico-deductivos, no es una defensa de la irracionalidad. Lo que salva a la ciencia de caer víctima de presuposiciones inapropiadas que perduran por mucho tiempo, es el papel aleccionador de la coordinación con el experimento y las

³⁷ Ibid., p. 14.

³⁸ Ibid., p. 16

múltiples verificaciones de cualquier descubrimiento por otros científicos que probablemente sostenían presuposiciones diferentes. Por eso, podemos reconocer todo este componente imaginativo y creativo como un factor esencial en la ciencia sin el cual se vería paralizado. Después de todo, los grandes logros científicos han sido conseguidos por gente con la capacidad para salir del plano x - y , sugerir nuevos caminos, arriesgarse a imaginar, a alcanzar niveles poéticos de ensoñación y luego proyectar los nuevos conceptos vislumbrados ahí, de nuevo al plano x - y para darles la certeza característica de la ciencia. La razón por la que una computadora no puede hacer ciencia es por su incapacidad para realizar estos malabares mentales, característicamente humanos.

Para cerrar esta sección creemos que es importante relacionar el tema con la dicotomía que tradicionalmente se le asigna a las llamadas ciencias y humanidades. Nos dice Javier Ordóñez que “para abordar el tema de la ciencia como cultura es necesario situarnos filosóficamente en una posición que no exija una división radical entre dos culturas distintas necesariamente alejadas: la ciencia y toda expresión cultural que no sea ciencia”.³⁹ Creemos que la tesis de Holton apoya la idea de Ordóñez de la ciencia como cultura pues esta lamentable separación entre ciencias y humanidades se debe, en buena medida, a la excesiva simplificación que se hace de la ciencia al considerar que únicamente se desarrolla en el terreno de lo empírico y lo analítico (plano x - y de Holton). Lo aquí expuesto apoya la idea de que hay muchos elementos comunes, en lo que se refiere a las fuentes intelectuales y motivacionales entre áreas diversas del conocimiento. Las ciencias y las humanidades tienen cada una su identidad y su forma de desarrollarse y evolucionar, pero también tienen afinidades que es importante descubrir.

1.3 La física como fuerza civilizadora

La ciencia, y en particular la física, ha sido a través de los tiempos una gran aventura intelectual por sí misma, pero a la vez ha influido y se ha alimentado de su entorno

³⁹ Véase Ordóñez (2001a, p. 11).

cultural, filosófico, económico, político y social. Esto es particularmente cierto en relación con la transición que experimentó la física a finales del siglo XIX y principios del XX, siendo este proceso de cambio sólo parte de una revolución más general en el pensamiento humano y en la cultura que incluyó todo tipo de esfuerzo intelectual. Esta amplia revolución intelectual caracterizó a esta época de cambio de siglo y significó toda una nueva actitud hacia la vida y el conocimiento. Por otro lado, el desarrollo de la nueva física, en sus planteamientos conceptuales, en sus métodos y hasta en sus objetivos mismos, se vio influenciado por las nuevas necesidades y exigencias del entorno social, y los logros científicos resultantes mostraron su importancia al trascender hacia otras esferas, “condicionando universos como los de la política, la industria y la economía”,⁴⁰ convirtiéndose así esta ciencia en verdadera fuerza civilizadora.

1.3.1 Fin de siglo: una revolución intelectual

El racionalismo que había regido la mayor parte del siglo XIX llegó a un momento de crisis al finalizar la centuria. Los avances científicos habían contribuido a la defensa del determinismo, el positivismo y el mecanicismo, pero nuevas posiciones a favor de un nuevo espíritu que reconociera la intuición, la libertad, el pensamiento especulativo y la espontaneidad surgían por doquier. En medio de este clima cultural e intelectual, aunado a sus propias crisis internas, la física sufrió sacudidas donde su identificación con una u otra posición filosófica fueron parte de su propia evolución. Físicos que vivieron en carne propia esos procesos de cambio, como es el caso del protagonista principal de este trabajo, es decir, Paul Ehrenfest, tuvieron que vivir en medio de la incertidumbre que eso implicaba.

Esta crisis intelectual generalizada adquirió mayor notoriedad en los años noventa, y para describirla se han utilizado diferentes denominaciones que la caracterizan sólo de modo parcial. Irracionalismo, neorromanticismo, neomisticismo,

⁴⁰ Véase Sánchez Ron (2001, p. 9).

antiintelectualismo son términos que, como lo señala Stuart Hughes⁴¹ representan sólo parcialmente esos nuevos movimientos, y se utilizan para intentar expresar el desprecio que esas corrientes mostraron por la mentalidad racionalista y objetivista y su deseo de volver a la senda de la imaginación y el subjetivismo. Sin embargo, dichas denominaciones no son del todo acertadas en cuanto que sugieren un alejamiento del pensamiento ilustrado, siendo que eso no corresponde a los esfuerzos intelectuales, pues los impulsores del nuevo pensamiento en realidad buscaban no una retirada de la racionalidad, sino, en todo caso, nuevas sendas de la misma.⁴²

Carl Schorske analiza particularmente el clima cultural que prevalecía en la Viena de cambio de siglo donde vivió Ehrenfest en su juventud.⁴³ Según este autor, el sueño de la sociedad racional guiada por la ciencia se venía desmoronando y surgían nuevas motivaciones hacia lo oculto y un rechazo de los valores y significados del pasado. Esta coyuntura intelectual llevaría, según Schorske, a una transformación del “hombre racional”, como dueño de sí mismo y con el dominio científico y moral de la naturaleza y de la sociedad, hacia el “hombre psicológico”, mucho más limitado y sujeto a fuerzas fuera de su control.⁴⁴ Esto conduciría a expresiones artísticas peculiares que se alejarían de una descripción directa e intuitiva de la realidad, reflejando el nuevo papel de la imaginación y la subjetividad. Y dado que la ciencia es tanto un producto de la época en que se produce como un conformador de la misma,⁴⁵ no sería muy arriesgado decir que muy probablemente no sea casualidad que en la ciencia, y en la física más específicamente, se siguieran caminos que también se alejarían de ese tipo de percepción objetiva y material y que llevarían hacia un camino progresivo de abstracción física, sobre todo cuando los

⁴¹ Véase Hughes (1977, pp. 33-66).

⁴² Hughes menciona a pensadores de la talla de Nietzsche, Durkheim y Freud.

⁴³ Nos referimos a la obra *Viena Fin de Siècle*: Véase Schorske (1981).

⁴⁴ Por supuesto, Schorske se refiere aquí fundamentalmente a la obra de Sigmund Freud que trajo a la luz una preocupación por el problema de la conciencia y el papel del inconsciente. Véase Schorske (1981, pp. 192-214). Se dice que el mismo Freud identificaba tres discontinuidades conceptuales que habían marcado el desarrollo del pensamiento occidental moderno y que habían producido sobresalto y angustia. La primera sería la visión de Copérnico de que la tierra, y por lo tanto, el ser humano, no era el centro del universo. La siguiente fue la de Darwin quien despojó al hombre de su estatus privilegiado en la creación. Y por último, estaría su propio trabajo que nos mostró que el hombre ni siquiera es dueño de sí mismo, sino que depende y está dominado por el nivel inconsciente de su propia mente.

⁴⁵ Véase Purrington (1997, p. 173).

nuevos objetos de estudio de esta ciencia se encuentran en la escala microscópica, alejándose así cada vez más de la experiencia sensible e inmediata, entrando en la representación de un mundo de entidades que no se ven, implicando esto que el factor “imaginación” tome una nueva dimensión e importancia.

Ahora bien, para poder enfocarnos, dentro de este tema, a lo más relevante respecto al presente trabajo, diremos que lo dicho anteriormente está planteado sólo a manera de contexto general en el ámbito cultural e intelectual. Pero para estudiar con mayor precisión los contactos de este contexto hacia y desde la física deberemos referirnos más específicamente, aunque sea de manera sucinta, a la lucha entre planteamientos filosóficos y epistemológicos que caracterizaron a esta ciencia en el período de transición a que hemos hecho alusión, pues, hay que decirlo, en esta época la inclinación filosófica de los científicos tenía mucha mayor influencia que en la actualidad, debido a la forma en que estas personas eran educadas, especialmente en Alemania, pero también en otras latitudes.⁴⁶

William Thomson (lord Kelvin) explicó en cierta ocasión en 1884 que la pregunta *¿entendemos o no un tema particular en física?* era equivalente a la pregunta *¿podemos construir un modelo mecánico de eso?* Otros, entre ellos Helmholtz y Poincaré, apuntaban a esa posibilidad de comprensión física haciendo referencia a la posibilidad de describir el fenómeno en términos de ecuaciones diferenciales, a manera de representación matemática de dicha concepción mecánica.⁴⁷ Paralelamente a esta concepción mecánica, se extendió la tendencia a buscar explicaciones de todo nuevo fenómeno natural en términos de nuevas formas de materia, concepción que podemos caracterizar como materialismo.⁴⁸ A lo largo de la segunda mitad del siglo XIX se fue reforzando la idea de que la ciencia pronto proporcionaría una explicación mecánica de todos los fenómenos del universo en

⁴⁶ Véase por ejemplo, Holton (1998c, p. 164). También habría que decir que la influencia de carácter filosófico raramente guía al científico de una manera abierta y consciente, pero que indudablemente está presente y operando a un nivel más sutil de lo que pueda parecer a primera vista (Purinton, pp. 19-20).

⁴⁷ Véase Purinton (1997, p. 21) y Sánchez Ron (2001, p. 210).

⁴⁸ Véase Brush (1994, p. 39).

términos del movimiento de las diferentes formas de materia. El componente filosófico de esta idea es lo que podemos caracterizar como *realismo*.⁴⁹

El tipo de expresiones neorrománticas a que nos referimos en párrafos anteriores como movimiento cultural que surge a finales del siglo, se manifestó contra este materialismo científico, como resultado de la insatisfacción que había crecido en torno a la física clásica. Este movimiento tuvo gran influencia en la interpretación filosófica de las nuevas corrientes de la física como se puede observar en la energética,⁵⁰ el empiriocriticismo⁵¹ y el positivismo,⁵² que jugaron un papel muy importante en el debate científico de finales del siglo XIX y principios del XX que, con toda seguridad, no pudieron ser ignoradas por todos los físicos inmersos en ese proceso de cambio. Esta influencia se extendió incluso de manera más decidida en la República de Weimar ya avanzado el siglo XX en la Alemania de post-guerra, convirtiéndose en verdadera fuerza cultural dominante.

Uno de los estudios más influyentes sobre el papel que juega el ambiente cultural en las elecciones de los físicos en torno a su propia disciplina es un ensayo de Paul Forman⁵³ que trata sobre el abandono de la causalidad por parte de los

⁴⁹ Véase Brush (1994, pp. 56-57).

⁵⁰ Siendo uno de sus principales representantes el químico W. Ostwald, la energética se desarrolló como una teoría que partía de la idea de que todo se reduce a flujos y transformaciones de las diferentes formas de energía. En términos generales se le puede considerar como una generalización de la termodinámica cuya pretensión era ofrecer una descripción fenomenológica unificada de todos los procesos físicos.

⁵¹ El empiriocriticismo tuvo como uno de sus principales defensores a E. Mach. Esta corriente apareció como una crítica hacia toda hipótesis científica que no se obtuviera directamente de la observación o la experimentación y tenía que ver más con el método que con el contenido de las ciencias. Mach afirmaba que dicha experiencia sólo se podía basar en las sensaciones. Por eso Mach siempre negó la realidad de los átomos e incluso de la misma materia, pues los verdaderos elementos del mundo serían los colores, los sonidos, las duraciones, los olores, los espacios y no las “cosas”. Lo que imaginamos como mundo “real” detrás de las apariencias y de las sensaciones sólo existe en nuestra mente. Véase por ejemplo Brush (1994, p. 61 y p. 280).

⁵² El término *positivismo* puede llevar a confusión, pues se ha utilizado con diversos significados. Uno de ellos se refiere a la idea de que los métodos de la ciencia experimental pueden aplicarse a otras disciplinas como la sociología y la historia; en este sentido, el término hace clara referencia a la influencia de la ciencia en la cultura, marcando su huella como cosmovisión, como método de conocimiento y como fuerza civilizadora. Sin embargo, en términos más filosóficos, el positivismo aparece como opuesto al materialismo y se acerca al idealismo y al empirismo o empiriocriticismo, reclamando que el materialismo va más allá de los límites de la observación haciendo hipótesis sobre lo desconocido que no pueden llevar a ningún lado. Véase por ejemplo Mandelbaum (1980, pp. 6-18) o Levinas (2001, pp. 319-329).

⁵³ Véase Forman (1971/1984).

científicos alemanes en la post guerra (1918-1927). Su argumentación se divide en tres partes. En la primera de ellas intenta demostrar que el ambiente intelectual de Weimar era particularmente hostil hacia los físicos y especialmente hacia la causalidad. Enseguida Forman intenta demostrar que hubo una “adaptación” de los físicos y los matemáticos a ese ambiente intelectual; estos científicos alemanes habrían rearticulado su propia ideología para que fuera congruente con los nuevos valores de su sociedad. Por último, Forman argumenta a favor de la existencia de un movimiento ampliamente difundido tendiente a evadir la necesidad de la causalidad en física, afirmando que dicho movimiento no puede relacionarse con ningún desarrollo interno de la física y que por lo tanto se le debe atribuir a las influencias culturales externas.

Sin embargo, no todos están de acuerdo con estas conclusiones. John Hendry,⁵⁴ por ejemplo, ha hecho uno de los análisis más completo de las tesis de Forman poniendo en duda algunos de sus argumentos. Para empezar, Hendry considera que los ataques de que fueron objeto los físicos y los matemáticos fueron, en todo caso, ataques sobre el *valor* de la física, más que sobre sus *contenidos*; la física tenía que ser causal y lo que se criticaba era su valor social y cultural, o bien su utilidad inmediata en la Alemania devastada por la guerra. Por otro lado, Hendry opina, contrariamente a Forman, que si se fue gestando un amplio rechazo de la causalidad en física, no fue por razones externas a la disciplina, sino por razones internas a la misma, o al menos por razones más complejas que las indicadas por Forman pues

cuando se toman en cuenta también consideraciones internas, resulta inmediatamente claro que ningún conjunto de influencias –internas, sociales, filosóficas, psicológicas, etc.- se pueden tomar en forma independiente unas de otras, y que la reacción de cada físico a un problema dado estará determinada por un complejo de motivaciones, muchas de ellas inmunes a la objetivación histórica.⁵⁵

⁵⁴ Véase Hendry (1980).

⁵⁵ Ibid., p. 317.

Sin embargo, aunque no se puede establecer una conexión directa entre los movimientos culturales y la innovación en física, es improbable que los físicos que vivieron en un mundo de gran efervescencia intelectual no fueran influenciados profundamente por sus tiempos. Seguramente los grandes cambios conceptuales y epistemológicos en que se vio envuelta la física durante esta transición de siglo tuvieron que ver tanto con ese ambiente cultural como con las nuevas realidades o nuevos niveles de fenómenos físicos que los científicos tuvieron que afrontar ya sea como una demanda directamente de su disciplina o también de las nuevas exigencias sociales. Muchos físicos no estuvieron preparados para una transformación conceptual total de su disciplina pero contribuyeron críticamente a su construcción. Al final, es difícil decir en qué sentido estricto se abandonó la mecánica. Los nuevos esfuerzos no llevaron a una aceptación total de puntos de vista como los que planteaba la energética o el empiriocriticismo, sino que, sin abandonar del todo las ideas mecánicas y haciendo malabares en torno a las hipótesis mecánicas sobre la interacción entre la materia y la radiación, se fue desprendiendo lo que después de una formalización matemática se convertiría en la nueva física, la física cuántica, a la que curiosamente, y parecería que casi de manera irónica, algunos llaman “mecánica” cuántica.

1.3.2 Institucionalización y nuevos compromisos y objetivos de la física

En el apartado anterior explicamos sucintamente la relación entre el desarrollo de la física y su contexto cultural. Vimos cómo claramente se pueden establecer puentes entre la ciencia, o particularmente la física, y otras manifestaciones culturales como la filosofía, al arte y otras preocupaciones humanas y sociales. De hecho, ver los diferentes esfuerzos intelectuales de manera aislada nos daría una visión distorsionada de la realidad de la época. Finalmente, la ciencia es parte del metabolismo cultural y los diferentes esfuerzos intelectuales se influyen mutuamente y en su dinámica conjunta dan por resultado una cierta cosmovisión. Por eso hemos sugerido hablar de la física como fuerza civilizadora importante. Sin embargo, la civilización no es sólo un conjunto de ideas o una visión del mundo, sino también la

disposición y posibilidad de transformar ese mundo, y en este sentido la física, junto con la química, ya había venido jugando un papel importante en el siglo XIX y llegaría a ser aún más importante en el siglo XX.

A finales del siglo XIX la física se empezaba a convertir, como ya lo venía haciendo la química tiempo antes, en una ciencia fuertemente asociada con la industria y el comercio, causando la admiración de propios y extraños por sus grandes logros.⁵⁶ Aunque Francia había conservado el liderazgo científico, sobre todo en el campo de la física, hasta ya bien avanzado el siglo XIX, lo perdió a lo largo de la segunda mitad del siglo, siendo superada por otras naciones, pero particularmente por Alemania,⁵⁷ país que ostentó de manera indiscutible dicho liderazgo a finales del siglo XIX y principios del XX. Fue en este país principalmente donde, desde principios de los setenta, la física tuvo la capacidad para ofrecer conocimientos teóricos y prácticos en campos como la electricidad, la óptica y la termodinámica, que eran de suma importancia para la industria. El caso de la electricidad es especial y su relación con la institucionalización de la física obviamente no se limita a Alemania. En general, las muy diversas aplicaciones de la electricidad empezaron a ofrecer un gran servicio a la industria y a la sociedad desde antes de mediados del siglo, pero de manera mucho más espectacular durante la segunda mitad del mismo. La telegrafía, las ondas hertzianas, algunos sistemas de transportes, el alumbrado, el teléfono, el motor eléctrico son tan sólo algunos ejemplos de la diversidad y el impacto de la ciencia en la sociedad del siglo XIX al provocar cambios profundos en el modo de vida y en la mentalidad de la gente; la ciencia y la tecnología se presentaban como algo sumamente poderoso.

Regresando al caso de Alemania, un ejemplo muy claro de la importante relación entre la ciencia y la industria fue la creación del *Physikalisch-Technische Reichsanstalt* (Instituto Imperial de Física y Tecnología), que comenzó a operar en

⁵⁶ Véase Jungnickel & McCormmach (1990, p. 2).

⁵⁷ Las razones de este cambio de liderazgo son múltiples. Sánchez Ron (1992, pp. 22-24) señala que, entre otras posibles explicaciones, un papel importante lo jugó el centralismo administrativo francés que era especialmente notorio en el sistema educativo superior, relegando a las provincias, que tardaron mucho en incorporarse de manera efectiva al desarrollo científico-tecnológico. Además, la investigación había tenido un papel muy reducido en las universidades francesas, en tanto que en Alemania ocurrió el fenómeno contrario.

1887, impulsado por el científico, inventor y empresario Werner Siemens.⁵⁸ El objetivo del Instituto era primordialmente fomentar la investigación físico-natural, una gran empresa que respondía a las necesidades de la época. En un principio el Instituto se dedicó primordialmente a problemas de metrología, tema de gran importancia para la industria por la necesidad de establecer estándares que favorecieran la importación.

A pesar de los objetivos aparentemente pragmáticos del Instituto, respondiendo a necesidades externas, es decir, a reclamos de la sociedad y de la industria, también llevó a cabo estudios que resultaron de gran importancia para la física fundamental, jugando un papel muy importante en la historia del cambio conceptual dentro de esta disciplina en torno a la figura del cuanto de energía en su relación con la radiación del cuerpo negro, por lo cual es muy relevante para algunos de los temas de esta tesis. Sólo mencionaremos aquí el punto culminante en este sentido, ocurrido en 1900, cuando los análisis de los físicos teóricos en torno a la radiación del cuerpo negro se encontraban en un callejón sin salida.⁵⁹ Las mediciones, de gran precisión, obtenidas por Lummer y Pringsheim en este Instituto, apuntaban a que los últimos resultados teóricos al respecto, particularmente la ley de Wien, no se verificaban experimentalmente, resultado corroborado luego por Rubens y Kurlbaum. Los resultados experimentales fueron utilizados por Planck quien llegó a formular la expresión correcta para la radiación del cuerpo negro utilizando la ley de la entropía de Boltzmann e introduciendo el concepto del cuanto de energía que cambiaría radicalmente el rumbo de la física.⁶⁰

Mencionábamos en apartados anteriores cómo a finales del siglo XIX prevalecía en la ciencia un enfoque mecanicista, y explicábamos, siguiendo las tesis de Paul Forman, cómo es posible argumentar que el ambiente intelectual de esa época fue desarrollando un sentimiento en contra de ese mecanicismo y materialismo

⁵⁸ Véase Sánchez Ron (1992, pp. 40-43).

⁵⁹ El Instituto Imperial de Física y Tecnología se involucró en el tema precisamente porque el grupo de óptica de la sección científica se encontraba buscando un estándar para la intensidad luminosa y las bases científicas para el estudio de los efectos de la radiación. Véase Jungnickel & McCormach (1990, p. 256).

⁶⁰ Para mayores detalles de esta historia véase Sánchez Ron (1992, pp. 41-43).

imperantes y que, más adelante, ese estado de cosas produjo, consecuentemente, una adaptación de los físicos que los hizo encaminarse a abandonar el principio de causalidad. De manera similar, y como complemento de este tipo de explicaciones, es posible decir que las exigencias externas (de la sociedad, de la industria) en el sentido de proveer soluciones a problemas concretos, sin importar mucho si éstas se sujetaban a las viejas reglas, contribuyó a que se abandonaran los modelos físicos más visuales y se optara por nuevos instrumentos técnicos y conceptuales más flexibles, aunque eso significara un mayor grado de abstracción. Los nuevos objetos de estudio y la necesidad de un mayor poder de innovación técnica llevó a reconsiderar y a flexibilizar los métodos empleados y el repertorio conceptual de los físicos, quienes se dieron mayor libertad para la elección de hipótesis abriendo así el camino hacia la nueva física cuántica. Esta nueva física ya no tendría la tarea de dar una explicación y una imagen espacio-temporal de los fenómenos, sino sólo de correlacionar por medio de una formalización matemática los resultados experimentales.

En resumen, las novedades que se introdujeron en la física a finales del siglo XIX, pero más aún las del nuevo siglo, sólo se pueden entender integralmente haciendo referencia a las necesidades internas de la disciplina, pero también al conjunto de situaciones culturales, sociales y económicas prevalecientes que en cierta medida condicionan las elecciones que los científicos van tomando en relación con la forma más conveniente de hacer avanzar su disciplina.

1.4 Semblanza de Paul Ehrenfest: el hombre, el maestro y el físico teórico

La nueva física fue surgiendo a partir de las tensiones entre diversos paradigmas clásicos de explicación. Particularmente los trabajos de Boltzmann, de Planck y de Einstein son muy representativos de los esfuerzos por reconciliar las visiones mecánica, termodinámica y electromagnética del mundo físico. Sin embargo, hasta 1911, año en que se organiza la primera conferencia Solvay, en la cual se reconoce la urgencia de poner en claro el papel que los nuevos cuantos de acción deberán jugar

en la física, pocos científicos estaban al tanto de las amenazas que el trabajo de Planck y de Einstein representaba a los puntos de vista tradicionales en la física y todavía menos los que se habían preocupado por clarificar los alcances de los nuevos conceptos en torno al cuanto. Paul Ehrenfest, físico austriaco que se encontraba viviendo en Rusia, y quien pronto sustituiría al afamado Lorentz como profesor de física teórica en Leiden, fue uno de los pocos interesados en tomar con seriedad dichos trabajos, especialmente los artículos de Planck, y tratar de definir su relación con la vieja física. A lo largo de varios años, Ehrenfest fue dejando su marca en el desarrollo de la teoría cuántica en sus varias fases.

Ehrenfest se convirtió en punto de enlace importante en la red de científicos. Fue muy apreciado por su talento para la discusión y el debate. Aprovechaba cualquier oportunidad para señalar los puntos débiles, las falacias y las paradojas de un concepto o teoría, y sus publicaciones fueron siempre dirigidas hacia los fundamentos de la física. Su capacidad crítica fue reconocida por la comunidad científica y su trabajo tuvo gran impacto en el surgimiento de la teoría cuántica. Además, sus discípulos recibían de él mucho más que lecciones de física, pues él ofrecía (aunque también requería de ellos), una dedicación total. Nos dice Martin Klein que “aunque sea fácil pensar que la física teórica tiene que ver exclusivamente con conceptos abstractos lejanos a los asuntos humanos ordinarios, Ehrenfest enseñaba y vivía la física con pasión”.⁶¹ En esta sección ofrecemos una breve semblanza de Paul Ehrenfest en su vida personal, en su pasión por la física y en su sentido de compromiso como guía de futuros científicos, aspectos que para él eran casi literalmente una misma cosa.⁶²

⁶¹ Véase Klein (1989, p. 30).

⁶² Esta sección que presenta una semblanza de Paul Ehrenfest está inevitablemente apoyada en la biografía titulada *Paul Ehrenfest: The Making of a Theoretical Physicist* escrita por Klein (1985), así como por el trabajo de Luntheren (2003) y Boeyink (2005) y por diferentes testimonios de quienes fueron sus discípulos (Burgers, Casimir, Uhlenbeck, Tinbergen, etc.).

1.4.1 Años de formación

Paul Ehrenfest nació el 18 de enero de 1880 en Viena y creció en la misma ciudad en el seno de una familia judía originaria de un pueblo localizado en Moravia. Fue el menor de 5 hermanos, de los cuales el mayor, Arthur, quien estudió ingeniería mecánica, tuvo gran influencia en despertar el interés del pequeño Paul por los rompecabezas matemáticos y por entender el funcionamiento de diversos dispositivos; fue gracias a su hermano mayor que Paul se familiarizó, desde niño, con ciertos conceptos físicos y científicos. En su familia no se seguían las tradiciones judías, pero no por eso dejaron de ser víctimas de discriminación y abuso. Paul desde pequeño conoció de la existencia de otras religiones, sus confrontaciones, las hipocresías en torno a ellas y desde los doce años abandonó la fe y le daba gran placer discutir y argumentar sobre lo absurdo y la falsedad de todas las religiones organizadas.⁶³

Los tiempos de sus primeros estudios fueron particularmente difíciles para el pequeño Paul, sobre todo por la pérdida de sus padres. Su madre murió en 1890 y su padre seis años más tarde. Ehrenfest sufrió en su niñez de severas depresiones relacionadas con amargas experiencias en la escuela por lo que tiempo después, como padre, insistiría en educar a sus propios hijos en casa.⁶⁴

Ehrenfest continuó en 1899 sus estudios en la Escuela Superior Técnica de Viena (*Technische Hochschule*), aunque también tomó cursos en la Universidad. Aunque se inscribió en química como su campo principal, muy pronto se vio atraído por la física teórica guiado por Ludwig Boltzmann, quien le transmitió la esencia y el espíritu de esa disciplina.⁶⁵ Era costumbre que los estudiantes en países de habla germana visitaran durante sus estudios varias universidades y Ehrenfest también siguió ese patrón. En 1901 se trasladó a Gotinga, donde permanecería año y medio.

⁶³ Véase Klein (1985, pp. 27-29).

⁶⁴ Ibid., p. 34.

⁶⁵ Ibid., p. 38.

Su estancia en Gotinga fue muy enriquecedora. Para Ehrenfest, Gotinga resultó un lugar de estudio ideal por sus actividades de enseñanza, la camaradería, la presencia de muchos compañeros de otros países y sobre todo por las intensas discusiones que ocurrían durante las reuniones semanales de los estudiantes. Fue ahí donde Ehrenfest desarrolló su independencia científica y se preparó para el inicio de sus propias investigaciones. Entre los compañeros extranjeros se encontraba una joven matemática, Tatiana Alexeyevna Afanassjewa, originaria de San Petersburgo. Era algunos años mayor que Ehrenfest, pero tenía, al igual que él, un fuerte espíritu independiente y, sobre todo, una fascinación por los fundamentos de las ciencias exactas. Además, ambos sentían la misma aversión por el alcohol, el tabaco u otros estimulantes. Después de dos meses de haber llegado a Gotinga decidieron casarse, aunque esperarían primero a terminar sus estudios.⁶⁶

Habiendo terminado su estancia en Gotinga, Ehrenfest realizó una corta visita a Leiden en la primavera de 1903, donde, junto con Walter Ritz, de quien se había hecho amigo, tomó unos cursos con Lorentz. Difícilmente podría haber imaginado Ehrenfest que Leiden se convertiría en el centro de su vida en menos de una década. Al término de esos cursos regresó a Viena para terminar sus estudios bajo la dirección de Boltzmann. Terminó su doctorado en junio de 1904 y en seguida se casó con Tatiana ahí mismo en Viena pero con el plan de vivir, en un futuro, en la tierra natal de su esposa. Las leyes Austro-Húngaras prohibían el matrimonio entre judíos y cristianos, por lo cual ambos tuvieron que declararse como no practicantes de religión alguna. En el verano de ese año visitaron Rusia con la intención de orientarse y planear su vida futura en ese país, pero Viena fue su lugar de residencia por casi dos años. En octubre de 1905 tuvieron a su primera hija, a quien llamaron igual que su madre.⁶⁷

Después de doctorarse, Ehrenfest continuó estudiando en la Universidad de Viena, atendiendo el seminario de Boltzmann y empezando a desarrollar sus propias ideas en torno a la mecánica estadística y su conexión con la teoría de la radiación de

⁶⁶ Véase Lunteren (2003, p. 2).

⁶⁷ Véase Klein (1985, pp. 45-52).

Planck. En ese momento no era prioritario encontrar una posición académica con ingreso fijo pues él y Tatiana podían vivir de pequeños ingresos que habían heredado, aunque Ehrenfest tenía la esperanza de obtener una posición académica en Gotinga. Con esa idea en mente, en la primavera de 1906 dejaron Viena, pasaron el verano en Suiza y posteriormente llegaron a Gotinga donde fueron recibidos con la noticia del suicidio de Boltzmann, lo que debió ser un golpe muy duro para Ehrenfest. Su esperanza de obtener un puesto parecía ciertamente lejana, pero el matemático Félix Klein lo invitó a participar en un seminario. Eligió hablar sobre el carácter estadístico de la segunda ley de la termodinámica. Su presentación tuvo gran éxito lo que convenció a Félix Klein de invitar a Ehrenfest a contribuir, si lo deseaba con la participación conjunta de su esposa, con un artículo sobre la mecánica estadística que formaría parte de la Enciclopedia Matemática que Klein estaba organizando. Este proyecto le tomaría casi tres años poder concluirlo.⁶⁸

En el otoño de 1907, Paul y Tatiana decidieron que ya era momento de llevar a cabo sus planes de mudarse a San Petersburgo. Ehrenfest nunca sintió a Viena como su hogar y el lugar de origen de su esposa era la alternativa como lugar de residencia estable. Ehrenfest buscó tener contacto directo con los físicos del lugar, y uno de ellos, Abram Fedorovitch Joffe se convirtió en amigo de toda la vida.⁶⁹

El clima intelectual en la Universidad de San Petersburgo era muy pobre y difería enormemente del que se podía encontrar en Gotinga. La investigación original no era estimulada. Ehrenfest trató de dotar de un nuevo espíritu a la física en San Petersburgo organizando conferencias informales cada dos semanas, por lo general en su propia casa, lo que fue un antecedente del coloquio que años después establecería en Leiden. Sin embargo, cinco años después, cuando la situación académica en Rusia, bajo los ordenamientos del nuevo ministro de educación, se

⁶⁸ Para mayores detalles sobre estos eventos, véase el capítulo 3.

⁶⁹ Joffe nació, igual que Ehrenfest, en 1880 y también provenía de una familia judía. Colaboró en Munich con W. K. Roentgen y se doctoró en 1906. En 1912 formó el seminario de física de San Petersburgo junto con Piotr Leonidovich Kapitza y Jacob Ilich Frenkel y el mismo Paul Ehrenfest.

deterioró aún más, Ehrenfest tomó la decisión de abandonar Rusia para buscar nuevos horizontes.⁷⁰

En enero de 1912 Ehrenfest empezó un recorrido por las principales universidades de habla alemana. Ya para entonces contaba con varias publicaciones importantes. Dentro de la comunidad de físicos teóricos su nombre era suficientemente conocido y su trabajo contaba con buena reputación. Sin embargo no tuvo éxito en encontrar alguna posición como profesor. En Leipzig tenía a un buen amigo, el matemático Gustav Herglotz, y aunque la universidad de esa ciudad no tenía mucho atractivo para Ehrenfest, la sola presencia de Herglotz era suficiente para él, pero desgraciadamente no contaba con las credenciales exigidas, que consistían en haber obtenido un doctorado de una universidad alemana. Otra posibilidad era Munich, donde Sommerfeld, quien había sido asistente de Félix Klein, había adquirido una gran reputación. Sin embargo tampoco hubo suerte en ese lugar. Las posibilidades en Praga eran mejores. Ahí conoció a Einstein, con quien sólo había tenido alguna breve comunicación previa, pero ese encuentro sería el inicio de una larga y poderosa amistad. Tenían casi la misma edad, compartían un mismo contexto judío, tenían los mismos intereses científicos y además compartían su aversión a las formalidades.⁷¹ Einstein estaba por dejar su puesto en Praga para regresar a Zurich y consideró que Ehrenfest era la persona ideal para sucederlo en la vacante que dejaría. Sin embargo, la rectitud de Ehrenfest canceló esta opción. Su negativa a abandonar su declaración previa, cuando se casó con Tatiana, en el sentido de no adherirse a ninguna religión, lo eliminaba como candidato según las rígidas regulaciones de la Universidad.⁷² Afortunadamente, a su regreso a San Petersburgo lo aguardaba una agradable sorpresa, una invitación de Lorentz a sucederlo como profesor de física teórica en Leiden, lugar donde residiría el resto de sus días. Lorentz había considerado en primera instancia para su sucesión a Einstein y al joven y brillante Peter Debye, pero ante la imposibilidad de que ellos lo sucedieran, y apreciando la claridad del trabajo de Ehrenfest y el hecho de que sus intereses fueran

⁷⁰ Para mayores detalles sobre la estancia de Ehrenfest en Rusia, véase Klein (1985, pp. 83-90).

⁷¹ Véase Lunteren (2003, p. 5).

⁷² Véase Klein (1985, p. 178).

muy cercanos a los suyos, en temas como la teoría de la relatividad, la mecánica estadística y la reciente problemática cuántica, no dudó en invitarlo. El 25 de septiembre de 1912 fue nombrado catedrático de física teórica⁷³ en la Universidad de Leiden, donde ejercería un fructífero profesorado por más de veinte años.⁷⁴

1.4.2 Ehrenfest como profesor y como crítico de su disciplina

Paul Ehrenfest se distinguió desde el principio por sus cualidades pedagógicas y críticas. Los estudiantes que podían seguirle el paso se beneficiaban en gran medida del trato personal que les ofrecía su maestro. Ya en su conferencia inaugural en diciembre de 1912 en Leiden, hacía él mismo referencia al hecho de que durante su presencia ahí, buscaría el contacto personal con sus estudiantes:

¡Damas y caballeros estudiantes! Mis deberes para con ustedes los entiendo de la siguiente manera: Deberé contribuir con todos mis conocimientos y habilidades a que ustedes encuentren, con el menor daño posible, el camino que corresponda a la esencia de sus talentos. Las lecciones sistemáticas que sostendré para ustedes sobre las diferentes disciplinas y problemas particulares de la física teórica deben ser un medio necesario pero de ninguna manera suficiente para aproximarse a esa meta. Sobre todo me será necesario entrar en contacto personal con cada uno de ustedes. Les pido ver en mí un camarada mayor y no un hombre que se encuentra en una etapa diferente de desarrollo científico (...)⁷⁵

Lorentz reconocía, poco después de esa conferencia, que Ehrenfest había logrado en poco tiempo lo que él había intentado, pero nunca conseguido, en su profesorado: hacer hablar a los estudiantes. Estos últimos podían ahora expresarse con toda confianza y Ehrenfest compartía con ellos sus mismas pasiones y sus mismas áreas de interés. La física y la vida fuera de la física no eran cosas diferentes

⁷³ La disciplina llamada *física teórica* como tal era relativamente nueva. Su equivalente anterior era la física matemática, pero con el nuevo nombre se hizo más énfasis en la intuición física que en la abstracción matemática, dándole a esa disciplina un status más autónomo. Este proceso de cambio disciplinar fue reforzado por el desarrollo de la teoría de la relatividad y los posteriores desarrollos dentro de la mecánica cuántica. Véase Jungnickel & McCormach (1990, p. 254).

⁷⁴ Para mayores detalles sobre la sucesión de Lorentz véase Lunzeren (2003, pp. 6-9).

⁷⁵ Véase el Apéndice 2.1 de esta tesis, pp. 205-206.

para Ehrenfest. Las preguntas que cada estudiante se planteaba sobre su existencia, Ehrenfest las asumía también.⁷⁶ El estilo de enseñanza de Lorentz se caracterizaba por sus lecciones formales y perfectamente preparadas. En cambio, Ehrenfest enseñaba de manera mucho más informal e intensa, involucrando a los alumnos en la física del momento, discutiendo asuntos concernientes a las más recientes publicaciones.⁷⁷ Les daba mucha mayor importancia a los conceptos cruciales que a la continuidad de los argumentos y las discusiones y las preguntas eran para él un componente esencial de la ciencia.⁷⁸

Sin embargo, la buena impresión que los alumnos de Ehrenfest tenían sobre él, no impedía que él mismo dudara siempre de sus cualidades. La imagen negativa que tenía de sí mismo se evidencia en muchas de sus comunicaciones con sus colegas. Ehrenfest argumentaba en una de esas cartas, dirigida tanto a Lorentz como a Debye, que este último habría sido mucho mejor elección como sucesor de Lorentz. En otra carta dirigida a su alumno Jan Burgers se refería a la brecha generacional que sentía de manera cada vez más intensa: “Siento ahora que pierdo rápidamente todo contacto con los más jóvenes y que me siento más viejo – cuál es la causa y cuál el efecto es algo que no sé”.⁷⁹

Desde el principio, a su llegada a Leiden, puso toda su atención y energía en la educación de sus alumnos, tratando de crear un ambiente intelectual como el que le había tocado vivir en sus tiempos de estudiante en Gotinga. El problema principal que advirtió fue la falta de contacto entre estudiantes y profesores por diferentes razones profesionales, sociales y de diferencias de edad. Una de sus primeras iniciativas estuvo dirigida a promover una comunicación más abierta. Estableció un coloquio semanal que se convertiría en algo esencial en el calendario de los físicos holandeses⁸⁰ y que con el tiempo tuvo una gran influencia en el estilo de hacer física

⁷⁶ Esta relación tan personal con sus alumnos también tenía por supuesto su lado negativo. Ehrenfest interfería seriamente con la vida de sus alumnos y en ocasiones incluso los hacía cargar con sus propias depresiones y dudas existenciales (Luntheren, 2003, pp. 12-13).

⁷⁷ Véase Boeyink (2005, p. 61).

⁷⁸ Ibid., p. 62.

⁷⁹ Ehrenfest a Burgers, 13 de diciembre de 1918, citado en Boeyink (2005, p.61).

⁸⁰ Dicho coloquio sigue existiendo en la actualidad y se le denomina *Colloquium Ehrenfestii* y sigue teniendo lugar, al igual que cuando lo inició Ehrenfest, los miércoles en la noche.

teórica en todo el mundo. En estas reuniones semanales, Ehrenfest logró reunir estudiantes, profesores e investigadores para escuchar ponencias sobre nuevas investigaciones, y sobre todo, para discutirlos. La presencia activa de Ehrenfest fue lo que distinguió estas reuniones de sus contrapartes en otras universidades, encargándose siempre de hacer preguntas que llevaran la discusión hacia los puntos esenciales del tema tratado y planteando sugerencias o reformulaciones de lo presentado. Uno de sus alumnos, Uhlenbeck, quien se convertiría en un destacado físico, resumió la esencia de las reuniones y del papel de Ehrenfest en las mismas de la siguiente manera: “Era una experiencia educativa (a veces un poco dolorosa si tú eras el orador) escuchar a Ehrenfest resumir la discusión y en ocasiones toda la plática, de tal manera que al final, todos, el orador incluido, entendían de qué se había tratado”.⁸¹ Los estudiantes podían asistir por invitación expresa de Ehrenfest, quien requería de ellos asistir regularmente, pues de lo contrario ya no eran admitidos, pues para Ehrenfest, el no asistir con regularidad una vez que un alumno era invitado, era un claro indicador de que el alumno carecía de un compromiso total hacia la física, tal como Ehrenfest lo demandaba. Además del coloquio, Ehrenfest también estableció un cuarto de lecturas exclusivo para las ciencias físicas que, en su visión, debería contener los textos y tratados principales, la colección de obras de los más importantes físicos y las revistas más importantes.⁸²

Su especial talento para dar clases se había manifestado desde antes de llegar a Leiden. Durante su estancia en Rusia, aunque nunca tuvo un puesto regular como profesor, sí enseñó oficialmente un curso en 1910 en el Instituto Politécnico de San Petersburgo sobre ecuaciones diferenciales en la física matemática. Para su amigo Joffe aquellas lecturas fueron maravillosas, y las describiría muchos años después comentando que “ninguna presentación de esta disciplina clásica había combinado jamás la física y las matemáticas en semejante unidad armoniosa”.⁸³ Algún tiempo después, ya en funciones como profesor en Leiden, enseñaba alternadamente dos cursos, uno sobre teoría electromagnética que finalizaba con la teoría del electrón de

⁸¹ Uhlenbeck (1956, p. 432).

⁸² Véase Klein (1985, pp. 9-10) y Klein (1989, pp. 35-37).

⁸³ Véase Klein (1985, p. 89).

Lorentz y la teoría de la relatividad de Einstein, y otro sobre mecánica estadística que concluía con las nuevas ideas en torno a la teoría cuántica, impregnando así sus cursos de la física del momento, de la física que se estaba haciendo y que era motivo de vigorosos debates que Ehrenfest promovía en su proceso de enseñanza. Las lecciones de Ehrenfest brillaban sobre todo por su viveza condimentada por metáforas y por su dominio incompleto del lenguaje (holandés).⁸⁴ De acuerdo con Uhlenbeck lo que hacía que las lecciones de Ehrenfest fueran tan excelentes, era en parte su claridad. Siempre se esforzaba por reconocer y resaltar el punto crucial del argumento. El énfasis siempre aparecía en las ideas físicas y la estructura lógica de la teoría. Tal vez sus alumnos no aprendían mucho “cómo calcular”, pero sí aprendían “cuál era la esencia del problema”, pues “sólo los fundamentos se desarrollaban cuidadosamente y se taladraban en nuestra mente”.⁸⁵

No era fácil llegar a ser estudiante doctoral de Ehrenfest, y de hecho procuraba no motivarlos mucho cuando no estaba convencido de sus cualidades. Para ser aceptado no era suficiente tener talento sino también una entera vocación por la disciplina. De hecho, Ehrenfest promovió sólo una decena de estudiantes, la mayoría de los cuales destacaron en gran medida en el mundo de la ciencia. La historia de algunos de ellos nos permitirá conocer también un poco más sobre el maestro.

En el periodo de 1918 a 1922, Ehrenfest promovió al grado doctoral a varios estudiantes (entre ellos los más destacados fueron Burgers, Kramers y Coster). El primero de ellos, Jan Burgers⁸⁶, llegó a Leiden en el otoño de 1914. Ehrenfest reconoció de inmediato su capacidad matemática. En un principio se interesó por la física experimental trabajando en el laboratorio de Kamerlingh Onnes, pero después

⁸⁴ Véase el prefacio escrito por Casimir a los *Collected Papers of Paul Ehrenfest* (Ehrenfest, 1959, p. XI).

⁸⁵ Véase Uhlenbeck (1956, p. 432).

⁸⁶ Jan Burgers escribió su disertación bajo la dirección de Ehrenfest en 1918 sobre el modelo atómico de Rutherford-Bohr, completando el trabajo de Ehrenfest sobre la conexión entre las reglas de cuantización de Bohr-Sommerfeld y las variantes adiabáticas. Fue profesor en Delft donde se convirtió en un experto en dinámica de fluidos. Más tarde formó parte de la facultad de la Universidad de Maryland donde desarrolló su interés sobre la relación de la ecuación de Boltzmann con las ecuaciones de la dinámica de fluidos. Además de su trabajo meramente científico, se interesó también por temas de interés social y/o filosófico más amplios. Datos biográficos obtenidos de *The Burgers Program for Fluid Dynamics* el 20 de febrero del 2007 en la dirección electrónica <http://www.burgers.umd.edu/about.htm>.

se orientó más por la teoría en la que eventualmente le dio continuidad a una de las principales aportaciones de Ehrenfest en torno a su principio adiabático. Burgers reconocía el talento de Ehrenfest como guía en el desarrollo científico de sus estudiantes:

“Ehrenfest nos enseñaba cómo leer artículos científicos, identificar los supuestos hechos por el autor, y descubrirlos cuando no eran dados en forma explícita. Su poderosa mente analítica abría nuestros ojos a muchas sutilezas de la teoría física. Siempre se esforzó por encontrar interpretaciones de nuevas ideas y tenía medios efectivos para la ilustración de sus peculiaridades (...) Ehrenfest abarcaba y enseñaba física teórica como un todo (...)”⁸⁷

Contemporáneo de Burgers, Hendrik Anthony Kramers, aunque en un principio no calificaba como físico según la apreciación de Ehrenfest por sus amplios intereses que le impedían una dedicación exclusiva a la física, al final se convirtió en su sucesor en Leiden en 1934. Un discípulo más de Ehrenfest que con el tiempo adquirió gran renombre fue Dirk Coster. Ehrenfest lo encaminó en el estudio de la espectroscopía y dirigió su tesis sobre *Espectros de rayos X y la teoría atómica de Bohr*. Mas tarde, trabajando junto con Bohr en Copenhague sentó las bases para el futuro descubrimiento del elemento hafnio. Posteriormente se desempeñó como profesor de física y meteorología en la Universidad de Groningen.

Poco después del periodo de guerra, Ehrenfest promovió al grado doctoral a varios estudiantes más (entre ellos se cuentan Uhlenbeck, Goudsmit, Tinbergen y Casimir). Uhlenbeck y Goudsmit fueron invitados por Ehrenfest en 1921 al coloquio de los miércoles. A Goudsmit le interesó el tema de la estructura fina del espectro. Siguiendo el consejo de su maestro pasó dos meses con Paschen en Tubinga para aprender la espectroscopia experimental. En 1924 trabajó también con Zeeman en su laboratorio de Ámsterdam, donde pudo especializarse un poco más en esa área. Presentó su examen doctoral en 1925 y Ehrenfest lo mandó unas semanas con Bohr a Copenhague. Uhlenbeck era un poco mayor. Por un tiempo fue a tomar algunas clases a Roma donde conoció a Enrico Fermi. Al regresar a Holanda siguió la

⁸⁷ Tomado de unas notas autobiográficas de Burgers citadas en Klein (1985, p. 209).

recomendación de Ehrenfest de que profundizara, junto con Goudsmit, en el tema de las líneas espectrales, cooperación que fue muy exitosa, dando por resultado la hipótesis del spin del electrón, paso de gran importancia en el desarrollo de la teoría de los espectros atómicos.⁸⁸ Uhlenbeck, según parece, heredó algunas de las virtudes de su maestro a juzgar por la siguiente cita de Cohen, alumno de Uhlenbeck al referirse a él:

“[Uhlenbeck] me advertía con frecuencia que en lugar de tratar de ser original, era mucho más importante ser claro y correcto y resumir críticamente el estado presente de un campo, en la misma tradición que Ehrenfest. Sabiamente observaba que lo que con frecuencia tiene valor duradero no es la primera contribución original a un problema, sino más bien la presentación final escrita clara y críticamente (...)”⁸⁹

Esto nos habla de la fuerte influencia de Ehrenfest en sus discípulos y la trascendencia de sus enseñanzas.

Un alumno muy especial de Ehrenfest fue quien años después se convertiría en el primer premio Nobel de economía. Nos referimos a Jan Tinbergen, quien estudió primero física teórica bajo la dirección de Ehrenfest. Tinbergen también apreciaba mucho a sus maestros:

“A Ehrenfest le debo mucho. Estudié física en una época en la que se encontraban juntas varias personas fascinantes. Gracias a él pude participar en discusiones con Albert Einstein. También estaban presentes Kamerlingh Onnes, Lorentz y Zeeman. Ser un estudiante en manos de tales maestros, es ser en verdad muy afortunado.”⁹⁰

Tinbergen nació en 1903 y creció en un ambiente que le permitió cultivar un gran sentido de responsabilidad social. Probablemente esto explica su cambio de intereses

⁸⁸ Existe una narración del descubrimiento del spin del electrón dada por el mismo Goudsmit y que después fue transcrita y publicada (Goudsmit, 1971). Se puede consultar una traducción de la misma, realizada por J. H. van der Waals, en la siguiente dirección de internet (consultada el 1 de marzo del 2007): <http://www.lorentz.leidenuniv.nl/history/spin/goudsmit.html#1>

⁸⁹ Véase Cohen (1990, p. 621).

⁹⁰ Citado en O'Connor & Robertson (1997).

de la física a la economía durante sus estudios de física teórica en Leiden, que en ese entonces era un pueblo industrial en el que había mucha pobreza, desempleo y serios problemas sociales. Pero sin duda influyó mucho su maestro Ehrenfest que en años previos había tenido gran interés en la economía, particularmente en las analogías que pudieran utilizarse en el estudio de estas dos disciplinas,⁹¹ y quien al ver los intereses de este brillante estudiante no dudó en estimularlo para que profundizara en esos temas y lo asesoró en una tesis que tenía el objetivo de aplicar las metodologías de la física teórica a la teoría económica y que concluyó en 1929. Este original trabajo le permitió marcar un punto de inflexión en la ciencia económica, introduciendo primero análisis de regresión y correlación, representando la economía como un sistema de ecuaciones diferenciales y examinando posteriormente empíricamente los elementos de causalidad en su teoría. Este trabajo académico de Tinbergen enriqueció sustancialmente la economía como ciencia y le otorgó un mayor prestigio y utilidad.⁹²

Finalmente, uno de los últimos estudiantes doctorales de Ehrenfest que gozó de gran éxito profesional, convirtiéndose en uno de los grandes físicos teóricos holandeses, fue Hendrik Casimir.⁹³ Ehrenfest tenía a Casimir en gran estima, en el sentido de su capacidad para la física teórica pues lo consideraba muy intuitivo y poseedor de gran devoción a la física.⁹⁴ A su vez, Casimir retrata a Ehrenfest en su pasión y compromiso por la física, refiriéndose a su trabajo y a su obra de la siguiente manera: “Cada una de sus páginas es testigo de su preocupación con la ciencia física. Cada uno de sus trabajos trata de aspectos fundamentales (...) Tiene gran preferencia por el uso de modelos simples que muestren los rasgos esenciales de un problema – y es un maestro inventándolos”.⁹⁵

⁹¹ Véase Klein (1985, p. 305-306). Según Klein, en los libros de notas de Ehrenfest, entre octubre de 1917 y mayo de 1918, Ehrenfest había mostrado un gran interés por la posibilidad de desarrollar una analogía entre la termodinámica y la economía, con el concepto de equilibrio como idea central, con la esperanza de que el formalismo de la termodinámica pudiera usarse para lograr nuevas perspectivas en la ciencia económica.

⁹² Véase Jolink (2003).

⁹³ Conocido por el *efecto Casimir*, que consiste en una débil fuerza que tiende a juntar dos láminas de metal paralelas muy próximas y que tiene una explicación de carácter mecano-cuántica.

⁹⁴ Véase Lunteren (2003, p. 37).

⁹⁵ Véase el prefacio escrito por Casimir a los *Collected Papers of Paul Ehrenfest* (Ehrenfest, 1959, p. XII).

Ehrenfest fue conocido entre la comunidad de físicos teóricos como el *Sócrates de la Física Moderna*. Es difícil resumir todo lo que Ehrenfest significaba para sus alumnos, pero la siguiente nota de Uhlenbeck cuando, ya trabajando en Ann Arbor, Michigan, en 1930, lo exhorta a aceptar su invitación a un Simposio de Verano de Física Teórica, es muy representativa del aprecio de sus alumnos:

¡Se te necesita aquí! (...)Te alegrarás mucho cuando te des cuenta de la manera en que hemos intentado introducir tus ideas aquí, y particularmente de que hemos tenido al menos un poco de éxito. Y para la continuación de nuestro trabajo es realmente muy importante que vengas aquí y que muestres cómo se puede hacer física de una manera amigable y entusiasta, y especialmente cómo un coloquio puede ser inspirador, instructivo y deleitable. No vienes como Profesor Visitante. Si ese fuera el caso, sería fácil encontrar un sustituto. Lo que queremos fundamentalmente, no son tus conferencias, tal vez ni siquiera tu física, sino sobre todo tu atmósfera, tu inspiración, de hecho tu sola presencia. Tu apodo, ‘Sócrates de la Física Moderna’, es espléndido y totalmente exacto. Pero ten en mente que para que tengas gran influencia como Sócrates, debes ser también un filósofo peripatético.⁹⁶

1.4.3 Ehrenfest: la física y otros intereses

Comprender verdaderamente la física avanzada era el centro y la razón de ser en la vida de Ehrenfest. Por el tiempo en que él realizaba sus estudios de física, esta disciplina era considerada por algunos como una empresa casi terminada y perfecta. Con la electrodinámica de Maxwell y la descripción mecánica de los fenómenos, se podía explicar casi todo. Pero para una mente inquisitiva como la de Ehrenfest, en la física aún había muchas preguntas por responder. A lo largo de su vida como físico teórico, se interesó por el estado y el papel que representaba el éter como hipótesis de la física que había prevalecido por décadas, por la mecánica estadística como vínculo entre los fenómenos microscópicos y macroscópicos, por las nuevas ideas cuánticas y sus fundamentos y principios, etc. Varios de estos temas de interés en el trabajo

⁹⁶ Carta de Uhlenbeck a Ehrenfest, 5 de mayo de 1930, citada en Klein (1989. p. 41-42).

científico de Ehrenfest se abordarán con mucho mayor detalle en los capítulos siguientes, de manera que aquí trataremos sólo en grandes líneas su incursión en las líneas generales de la física, así como otros temas relacionados que también atrajeron su atención.

El momento en que Ehrenfest tomó posesión de su cargo en Leiden se sitúa justamente en el centro de un periodo turbulento en la física. La comunidad de los científicos que trabajaban esta disciplina apenas empezaba a tomar conciencia del significado de la teoría de la relatividad especial de Einstein, y por otro lado, el congreso Solvay de 1911 había traído a la superficie temas que ponían en riesgo las bases mismas de la física. En 1900 el físico alemán Max Planck había presentado una ley que describía la radiación del cuerpo negro, la cual rápidamente fue avalada por datos experimentales. Sin embargo, poco después de 1905, resultó evidente que la derivación de la ley de Planck se basaba en suposiciones extrañas. La interacción entre materia y radiación se desviaba de la noción clásica que explicaba que la fuente de radiación debía poder entregar y recibir energía en forma continua. Con Planck, la energía de la fuente de radiación resultó cuantizada; la energía podía adoptar sólo valores fijos, múltiplos de $h\nu$ (donde h es la constante de Planck y ν la frecuencia de la radiación). Esta cuantización se consideró por un tiempo no como fundamental (incluso por el mismo Planck), sino más bien como artificio matemático para poder concordar con las observaciones. Ehrenfest analizó el trabajo de Planck en tres publicaciones en 1905, 1906 y 1911.⁹⁷ Este último artículo, que apareció un mes antes del primer congreso Solvay, fue también del conocimiento de Lorentz poco antes de que pusiera su mira en Ehrenfest como su posible sucesor. En ese artículo Ehrenfest mostró la cuantización de la energía como condición necesaria para la derivación de la ley de Planck, y por lo tanto, como propiedad fundamental de la realidad física. Dicho artículo fue además un primer comienzo de lo que se convertiría en la principal aportación de Ehrenfest a la física, es decir, el *principio*

⁹⁷ Véase capítulo 4. Por las mismas fechas Ehrenfest estuvo muy interesado por los temas de la mecánica estadística (véase capítulo 3), lo cual no es casualidad, pues su interés por indagar los fundamentos del trabajo de Planck seguramente tenían que ver con el uso que Planck hacía de la interpretación estadística introducida por Boltzmann y que Ehrenfest conocía muy bien.

adiabático,⁹⁸ que junto con el principio de correspondencia de Bohr, buscaría una conexión entre las reglas cuánticas y las teorías tradicionales.

La hipótesis cuántica fue utilizada por el físico danés Niels Bohr para desarrollar una teoría relativa a la estructura atómica. El átomo de Bohr consistía en un núcleo cargado positivamente y electrones cargados negativamente girando alrededor, como ya lo había hecho Rutherford, pero Bohr aplicó adicionalmente reglas cuánticas para la asignación de energía de los electrones. Lo más problemático en la hipótesis de Bohr era su sugerencia de que la frecuencia de la radiación emitida por un átomo no tenía nada que ver con la frecuencia del movimiento periódico de los electrones. Esta suposición iba en contra de la electrodinámica tradicional y de todas las ideas conocidas sobre ondas y vibraciones. De acuerdo con Bohr, la emisión de la radiación era consecuencia de los saltos bruscos de los electrones de una órbita a otra de acuerdo con las reglas cuánticas y la frecuencia de la radiación estaba determinada solamente por las diferencias de energía. Sin embargo, esta suposición absurda le permitía calcular las frecuencias específicas de la radiación espectral de los átomos de hidrógeno. Algunos físicos, entre ellos Einstein y Sommerfeld, tomaron en serio la teoría impresionados por los resultados que ofrecía. Otros vieron en su derivación sólo ideas sin sentido. Ehrenfest se encontraba entre los escépticos. En una carta a Lorentz, confesaba que el trabajo de Bohr lo había llevado a la desesperación: “si ésta es la forma de alcanzar la meta, debo renunciar a hacer física”.⁹⁹ Por eso, en tanto que Bohr insistía en mostrar la importancia del análisis espectral con el fin de extender la teoría cuántica, Ehrenfest seguía de momento por su propio camino y llegó a escribir en 1916 una amplia presentación de su principio. Dicho artículo se convirtió en una importante contribución al desarrollo de la teoría cuántica. Sin embargo, después de esa publicación, se apartó del tema por algún tiempo dejando a su alumno Jan Burgers, que poseía gran habilidad matemática, que desarrollara una exploración más profunda de esas ideas.¹⁰⁰

⁹⁸ Véase capítulo 5.

⁹⁹ Ehrenfest a Lorentz, 25 de agosto de 1913, citada en Klein (1985, p. 278).

¹⁰⁰ Véase Luntheren (2003, pp. 16-17).

La pérdida de interés de Ehrenfest por la teoría cuántica se debió probablemente a su desilusión por el hecho de que su trabajo tuvo muy poca resonancia en esos años. Ehrenfest dirigió su interés a otras áreas. Una de ellas fue el problema de la dimensionalidad en física. En 1916, el físico finlandés Gunnar Nordström visitó a Ehrenfest en Leiden. Este físico había publicado recientemente sus ideas en torno a un modelo unificado del universo de cinco dimensiones, y las discusiones que Ehrenfest tuvo con él sobre la generalización de la electrodinámica a un espacio de N dimensiones lo llevaron a profundizar sobre la cuestión respecto a por qué el espacio es tridimensional.¹⁰¹ Dichas investigaciones lo llevaron a publicar un trabajo en 1917 sobre el papel de la tridimensionalidad en la naturaleza, en el que hacía notar que muchos aspectos de las leyes físicas dependían fuertemente del número de dimensiones del espacio.¹⁰² Alrededor de la misma época, otro tema que atrajo poderosamente su atención, como ya se mencionó antes en relación con su alumno Tinbergen, fue la teoría económica, intrigado por la posibilidad de desarrollar una analogía entre la termodinámica y la economía. Sin embargo, al término de la guerra ya había vuelto su interés por los temas de la teoría cuántica.

El estímulo para retomar su pasión por los temas de la teoría cuántica fue posiblemente la recepción que Bohr le había dado a su principio adiabático. En una comunicación, Bohr sopesaba el valor del trabajo de Ehrenfest refiriéndose a “el gran progreso (...) recientemente obtenido por Ehrenfest”,¹⁰³ quien había podido encontrar coherencia a las aparentemente confusas reglas cuánticas. El principio adiabático y su propio principio de correspondencia eran, en opinión de Bohr, las guías para el futuro desarrollo de la teoría cuántica. Tiempo después, en 1925, Ehrenfest dirigió su atención al campo de investigación que antes había sido una de sus pasiones: la mecánica estadística, pero ahora a la luz de la nueva teoría cuántica. En febrero de 1925 Einstein había trabajado en lo que después sería conocido como la estadística de Bose-Einstein. Las partículas perdían su carácter individual, lo que

¹⁰¹ Para un tratamiento más amplio sobre la relación de Ehrenfest con Nordström véase Halpern (2004).

¹⁰² Véase Barrow (2002, pp. 217-220).

¹⁰³ Citado en Pais (1991, p. 190).

llevaba a un cambio en el enfoque estadístico. Ehrenfest se encargó de introducir la interpretación física, en el estilo en que sus colegas estaban acostumbrados.¹⁰⁴

Si bien la física era su pasión, Paul Ehrenfest también encontró gran placer en el estudio de muy diversos temas. Los intereses de una persona con frecuencia se ven reflejados en lo que expresan desear para sus hijos. Los Ehrenfest amaban a su pequeña hija Tania, tenían un enorme interés en su desarrollo intelectual y se sentían muy orgullosos por su precoz inteligencia.¹⁰⁵ En cierta ocasión en 1912, Ehrenfest escribió un esquema elaborado de la diversidad de temas que él y su esposa esperaban que la pequeña Tania llegara a conocer.¹⁰⁶ La lista era un catálogo de todo lo que en ese momento era excitante en el campo de las ciencias: matemáticas - “todos los aspectos de esta gloriosa ciencia: sus finuras conceptuales, las relaciones entre sus partes más heterogéneas (...) los aspectos puramente metodológicos (...) maestría en las habilidades de cálculo, imaginación geométrica e intuición lógica”-, mecánica, física, química, cristalografía, biología, psicología, economía, etc. Sin embargo, dicho programa educacional no se restringía a las ciencias. Ehrenfest incluyó temas de historia cultural, historia de la ciencia y otras disciplinas. Su interés por temas diversos, a veces alejados de la física, los mostró también en el trato con sus alumnos. En cierta ocasión, después de una conferencia que ofreció en Wageningen en 1919, se embarcó en una discusión con un grupo de estudiantes. Probablemente por su reputación o por algún comentario dentro de la conferencia, salieron a la luz temas de la filosofía de la vida (*Lebenphilosophien*), que lo llevó a tener con ellos otra reunión más amplia en donde discutieron “sobre cuestiones de educación, política y (cosmovisiones) religiosas”.¹⁰⁷

¹⁰⁴ Véase Boeyink (2005, p. 73).

¹⁰⁵ La primogénita de los Ehrenfest, Tatiana Pavlovna Ehrenfest (su nombre de casada es Tatiana van Aardenne-Ehrenfest), estudió matemáticas y física en la Universidad de Leiden. En 1928 tomó cursos en Gotinga bajo la dirección de Harald Bohr y Max Born. Obtuvo su Ph. D. en Leiden en 1931. En el campo de las matemáticas se le reconoce por el teorema BEST, (de **B**rujin, van **A**ardenne-**E**hrenfest, **S**mith y **T**utte).

¹⁰⁶ Esta información se basa en Klein (1985, pp. 90-91), quien a su vez toma la información de un libro familiar de los Ehrenfest.

¹⁰⁷ Ehrenfest a Bohr, 4 de junio de 1919, citado en Boeyink (2005, p. 65).

1.4.4 Ehrenfest: internacionalización y las funciones sociales de la física

Ehrenfest le dio un giro a la física, y sobre todo a la enseñanza de la misma, en Holanda. Guió a una nueva generación de físicos holandeses y la mayoría de sus estudiantes doctorales se convirtieron en profesores universitarios dentro de las mismas fronteras holandesas o en el extranjero. Ehrenfest se convirtió además en uno de los nodos de la red de físicos europeos preocupados por la nueva teoría cuántica y contribuyó regularmente a las reuniones internacionales que se organizaron sobre la teoría atómica. Sin embargo, su influencia no se limitó a estos aspectos del desarrollo de su disciplina, sino que también se preocupó por el papel de la ciencia en la sociedad y llevó a cabo acciones locales dirigidas hacia una reforma de la universidad.¹⁰⁸

En 1891 se había fundado en Eindhoven, al sur de Holanda, la compañía Philips, cuyo giro inicial fue la producción de lámparas incandescentes. En 1910 había establecido su propio laboratorio de investigación (NatLab). Paul Ehrenfest y Leonard S. Ornstein (catedrático en Utrecht) fueron nombrados consultores académicos en el NatLab, con lo cual Ehrenfest pudo jugar un papel activo en la interacción entre la universidad y la industria.¹⁰⁹ Al principio, en los años 20's, esta situación representó para Ehrenfest un apoyo económico, pues obtenía un ingreso extra organizando una serie de conferencias en el NatLab. Con el transcurso del tiempo fue afirmándose en él la convicción de que era importante formar no sólo físicos teóricos fielmente consagrados a la ciencia pura y cuya preocupación principal tuviera que ver con principios esotéricos y abstractos en física atómica, sino también profesionales preparados para atender los nuevos laboratorios industriales e interesados en comprender los métodos particulares de investigación usados en ellos. Este cambio de actitud respecto a la relación entre la ciencia, la universidad y la sociedad, lo llevó a promover en 1928 la candidatura de Gilles Holst, quien fungía desde 1916 como director del NatLab, para un puesto especial de profesor.

¹⁰⁸ Esta sección se basa principalmente en Luntheren (2004).

¹⁰⁹ Véase Boeyink (2005, p. 64).

Sin embargo, ese cambio de visión de Ehrenfest respecto al papel de la universidad en la sociedad, no se debió solamente a su relación con la compañía Philips. Probablemente fue más decisiva su visita a los Estados Unidos en 1923-1924, donde había sido invitado por Robert Millikan a dictar unas conferencias en el *California Institute of Technology*, invitación a la cual Ehrenfest accedió pensando en la posibilidad de poder establecer contactos que resultaran beneficiosos para los nuevos físicos holandeses.¹¹⁰ Ehrenfest quedó asombrado por el carácter práctico de las universidades americanas y por los mecanismos de enlace entre la investigación y las necesidades sociales, lo cual contrastaba mucho con el carácter de las universidades holandesas (o europeas en general). Aunque en un principio Ehrenfest creía que la física debía estudiarse por su valor intrínseco como ciencia pura, después fue apreciando muchos aspectos de la vida académica americana. En su segunda visita a los Estados Unidos en 1930 quedó aún más impresionado por el sistema americano y urgió a las autoridades de la Universidad de Leiden a realizar algunas reformas a la misma. Aunque en opinión de algunos, incluyendo el presidente del consejo, las universidades americanas carecían de profundidad cultural, resultaba claro que en el campo de las ciencias sí era necesaria una mayor cooperación con la industria. En el mismo año de 1930 se había fundado el *Instituto Nacional para la Ciencia Aplicada*, cuya función era actuar como intermediaria entre la universidad y la industria, pero Ehrenfest y Hugo Kruyt (químico de la Universidad de Utrecht) eran de la idea de que esto era sólo un primer paso para abandonar el aislamiento de las universidades holandesas y permitir que la industria se beneficiara del conocimiento más fundamental que ofrecía la ciencia.

Además, en términos más generales, Ehrenfest abrigaba la esperanza de que la comunidad internacional de físicos sirviera de ejemplo de hermandad internacional, pues dentro de ella se hablaba un lenguaje común y se seguían reglas de comportamiento racional. En la visión de Ehrenfest, si la economía y la política se desarrollaran en base a principios científicos, podrían ayudar a crear y dar forma a la

¹¹⁰ De hecho, algún tiempo después de su visita a los Estados Unidos, su alumno Gerhard Diele se fue a Berkeley a trabajar con el espectroscopista americano Birge y poco después George Uhlenbeck y Samuel Goudsmit obtuvieron cargos como profesores en la Universidad de Michigan.

estructura del estado futuro, es decir defendía una visión tecnocrática de los futuros gobiernos.

De esta manera, Ehrenfest, sin haber crecido en Holanda, tuvo el privilegio de dejar huella en el desarrollo de la física holandesa y de fomentar su relación con la industria y la sociedad.

1.4.5 Desesperanza, tragedia y muerte de Ehrenfest

Ehrenfest se vio toda su vida abrumado por sentimientos de incertidumbre respecto a su desempeño como investigador, y en sus últimos años (después de 1926), también respecto a su labor como profesor. No sólo se sintió incapaz de ofrecer alguna contribución a la teoría cuántica, sino ni siquiera de poder dar seguimiento a su acelerado y caótico desarrollo. Las nuevas teorías tenían un nivel de abstracción mucho mayor que la vieja teoría cuántica. La posibilidad de visualización de los fenómenos había cedido su sitio al uso de complejas operaciones matemáticas. En tanto que muchos físicos pertenecientes al viejo orden ignoraron los nuevos desarrollos tanto como les fue posible, a Ehrenfest lo llevaban a la desesperación, haciéndolo sentir que había perdido el rumbo.¹¹¹

Los problemas de Ehrenfest para sostenerse ante la situación que guardaba la física, su disciplina, se agravaron con la muerte de Lorentz en 1928 y por el gradual distanciamiento de su esposa. Ella pasaba largas temporadas en Rusia, pero la separación no era sólo geográfica y tuvieron la intención de disolver su matrimonio, aunque dicha intención nunca se llevó a cabo.

Ehrenfest anhelaba cancelar su trabajo en Leiden e incluso concluir su “inútil” vida. Lo único que lo sostenía era que sus cuatro hijos dependían de su ingreso. El menor de ellos, Vassily, había sido diagnosticado con síndrome Down y Ehrenfest deseaba evitar que su cuidado fuera una carga para sus otros tres hijos

¹¹¹ Véase Lunteren (2003, p. 31).

(Tania, Galya y Paul).¹¹² Buscó con su amigo Joffe, quien ahora contaba con una posición prominente en el mundo científico de Rusia, una nueva posición en la Unión Soviética. Su aspiración era construir una nueva vida, pero las cosas no resultaron de acuerdo a los planes. Así, el destino de Ehrenfest parecía estar ya definido. En el verano de 1932 había escrito una carta de despedida a sus mejores amigos (Bohr, Einstein, Herglotz, Joffe y Kohnstamm), pero que nunca fue enviada y en la cual explicaba que el suicidio era su única alternativa.

En Julio de 1933 aparentemente hubo una mejora en su estado de ánimo. Incluso desarrolló algunos planes con Casimir sobre algunas investigaciones a realizar. En agosto pasó unos días en Schiermonnikoog y en septiembre estuvo unos días en Copenhague. Pero no sirvió de nada. En Copenhague dejó una impresión extraña al concluir su visita. Dirac recordó posteriormente haber escuchado una rápida alusión sobre el fin de su vida. Ya de regreso en Holanda, y habiendo perdido la batalla contra la depresión que lo agobiaba, viajó el 25 de septiembre al Wateringinstituut en Ámsterdam donde estaba siendo tratado su hijo Vassily. Después de convivir con él una hora, tomó un arma, le disparó primero a su hijo y enseguida a él mismo, poniendo fin a un largo calvario.

¹¹² Véase Lunteren (2003, p. 32).

2 Origen, ascenso y muerte de la hipótesis del éter y el ojo crítico de Paul Ehrenfest

La ciencia, o mejor dicho, algunos de sus protagonistas, ocultan en ocasiones la verdadera identidad de esta actividad humana, presentándola como generadora de conocimiento totalmente objetivo, libre de intereses personales y basada únicamente en la experiencia y la razón. Esto ha conducido en buena medida a que la percepción pública de la empresa científica sea la de un proceso frío, calculado y que lleva a resultados inevitables, es decir, al descubrimiento de la realidad exterior. Esta falsa imagen de la ciencia se ha dado de manera especial en el caso de la física. Sin embargo, actualmente pocos científicos, y aún menos filósofos de la ciencia, comparten esa visión simplista que mutila el complejo entretejido de la ciencia que, si bien se fundamenta en buena medida en su base empírica y su tratamiento lógico, también se alimenta de otros elementos sin los cuales se vería paralizada. Bronowski nos dice respecto a la construcción de teorías científicas que

El hombre que propone una teoría, hace una *elección* – una elección imaginativa que va más allá de los hechos. La actividad creativa de la ciencia reside aquí en el proceso de inducción, entendido como el proceso de generar teorías hipotéticas. Y es que la inducción imagina más de lo que se puede justificar, y crea relaciones que, en el fondo, no pueden ser verificadas. Cada inducción es una especulación y le apuesta a una unidad que los hechos sugieren, pero que no implican estrictamente.¹¹³

Usamos la cita anterior con un doble propósito. En primer lugar para resaltar el carácter imaginativo de la actividad científica.¹¹⁴ Y en segundo lugar para tomar el término *elección* como palabra clave que nos lleva precisamente a la consideración de que una disciplina dada puede tomar rumbos distintos, que dependen de múltiples factores, cuyas raíces se tienen que buscar en lo psicológico, lo social y lo cultural; aspectos que tienen que ver con gustos, creencias, motivaciones personales, etc. Einstein mismo comprendía esto cabalmente y objetaba que otros científicos

¹¹³ Véase Bronowski (1977, pp. 10-11). La letra itálica es nuestra.

¹¹⁴ Véase por ejemplo Guzmán (2004).

hablaran de los productos de su imaginación como si fueran “necesarios y naturales”, que se pensara en ellos como “realidades dadas” y no como “creaciones del pensamiento”.¹¹⁵

No hay tema que ejemplifique mejor el carácter imaginativo y contingente de las construcciones científicas que la idea del éter, especialmente en su desarrollo a lo largo del siglo XIX y principios del XX. William Thomson (lord Kelvin), quien llegara a ser el científico inglés de mayor influencia a finales del periodo decimonónico, y quien trabajó incansablemente por conservar una imagen mecánica del mundo, llegó a decir sobre el éter que “su existencia es un hecho incuestionable”.¹¹⁶ Vale la pena observar el carácter tan definitivo de una declaración como ésta y recordar que varias décadas después aparecerían teorías que harían del éter un concepto del cual se podría prescindir.

Nos dice Martín Klein que “se puede encontrar una puerta que nos lleve al pasado de las ciencias físicas en las conferencias inaugurales que los físicos han ofrecido al iniciar sus labores como profesores”.¹¹⁷ Precisamente a principios del siglo XX, cuando la hipótesis del éter se encontraba en una encrucijada, Paul Ehrenfest abordaba explícitamente el tema en su conferencia inaugural en la Universidad de Leiden. George Gamow, quien conoció a Ehrenfest, lo describía como un miembro invaluable de la comunidad científica y se refería a él distinguiendo su conocimiento amplio y profundo de la física y, sobre todo, su aguda capacidad crítica en torno a los temas fundamentales de su disciplina.¹¹⁸ Coincidimos con Gamow en esa apreciación y creemos que podemos aprender mucho de lo que dijo o escribió Ehrenfest. Por eso, nuestra intención en este capítulo es abordar algunos aspectos en torno a la hipótesis del éter y su historia, haciéndolo desde la perspectiva de este brillante físico teórico a quien le tocó ser partícipe de los cambios fundamentales que sufrió, a principios del siglo XX, la imagen física que tenemos del mundo.

¹¹⁵ Citas tomadas de Holton (1998c, p. 4).

¹¹⁶ Citado en Zajonc (1996, p. 149).

¹¹⁷ Véase Klein (1993, p. 5).

¹¹⁸ Véase Gamow (1966/1985, p. 52).

2.1 Planteamientos preliminares

Para este examen histórico sobre el éter, basado en la percepción personal que tenía Ehrenfest como científico a quien le tocó vivir en una época en la que confluían ideas que transformarían la física, consideramos pertinente exponer primero, de manera muy breve, algunos elementos que servirán como punto de apoyo, de comparación y de contexto para el análisis de la siguiente sección de este escrito.

2.1.1 Consideraciones y cuestionamientos desde la filosofía de la ciencia

Paul Ehrenfest poseía un gran talento para identificar los aspectos fundamentales y centrales de un tema, y sobre todo para plantear las preguntas cruciales.¹¹⁹ En la sección 2.2 veremos cómo aborda Ehrenfest, de manera puntual y penetrante, el tema del éter. Valdrá la pena que contrastemos, en su momento, sus cuestionamientos desde su perspectiva como físico, con otros cuestionamientos relevantes planteados desde la filosofía de la ciencia apoyándonos en cuatro reconocidos filósofos de la ciencia: Karl Popper, Imre Lakatos, Ian Hacking y Gerald Holton. Aunque ya no referimos a ellos en términos generales en la sección 1.2.1 de esta tesis, en este espacio desarrollamos sucintamente algunos conceptos adicionales de esos autores que consideramos relevantes para el análisis de este capítulo.

Karl Popper, un filósofo de la ciencia cuyas ideas se alimentaron en buena medida de los desarrollos de la física, y quien se inspiró mucho en los trabajos de Einstein, nos dice que las teorías científicas son fundamentalmente conjeturas o invenciones que se ponen a prueba. Para él, el criterio de demarcación entre ciencia y pseudociencia consiste en que la primera está constituida por teorías *falsables*, es decir, susceptibles de ser demostradas como falsas. ¿Es posible falsar la hipótesis del éter? Trataremos de ahondar en esto más adelante.

¹¹⁹ No en vano sus estudiantes se referían a él como “tío Sócrates” (Klein, 1989, p. 41).

Imre Lakatos es seguidor de Popper y se puede considerar, por tanto, como *falsacionista*. Sin embargo, sus posturas filosóficas difieren en varios aspectos de las de Popper. No es éste el espacio adecuado para desarrollar las tesis que plantea, como tampoco lo hicimos con Popper, pero sí podemos decir que Lakatos no cree que la falsación de las teorías sea un elemento relevante. Él considera, a diferencia de Popper, que el papel del experimento no es falsar una teoría, sino contrastar dos o más teorías oponentes que forman parte de un mismo programa de investigación, de las cuales, una de ellas saldrá victoriosa de acuerdo a los resultados de los experimentos. Esto es, desde luego, una sobre simplificación, pero con relación al éter nos permite cuestionarnos sobre las diferentes teorías que estuvieron en juego y sobre los experimentos que se idearon para ponerlas a prueba.

Y ya que hablamos de experimentos, no podemos dejar de hablar de Ian Hacking, quien le da una relevancia especial a este aspecto de la actividad científica y no privilegia, como hacen otros filósofos de la ciencia, solamente a la teoría. Además, en lo que se refiere a la facultad racional como una de las facultades fundamentales para hacer ciencia, él la divide en dos: la facultad especulativa y la de cálculo. La primera se entiende como un juego de reestructuración de las ideas, mientras que la segunda se entendería, no en el sentido de cómputo numérico, sino de articulación “matemática de una especulación, de tal manera que se armonice más con el mundo”.¹²⁰ Esta separación de la facultad teórica en dos elementos diferentes debe resultar especialmente relevante en las hipótesis del éter, pues por un lado encontramos la especulación cualitativa sobre la naturaleza de esta entidad teórica, y por otro, todo el aparato matemático para la representación de las propiedades del mismo.

Para Gerald Holton, como ya lo apuntamos en el capítulo anterior, en las secciones 1.2.2 y 1.2.3, además de las dimensiones fenoménicas y analíticas en torno a las cuales se justifica el conocimiento científico, existe un tercer mecanismo que entra en operación en el proceso de hechura de la ciencia, en la construcción de las teorías. Se trata de las presuposiciones fundamentales que guían a los científicos y

¹²⁰ Véase Hacking (1996, pp. 242-243).

que pueden ser personales o compartidas por un grupo. Holton les llama *themata* refiriéndose a “aquellos prejuicios de una índole estable y sumamente difundida que no son directamente resolubles ni derivables a partir de la observación y del raciocinio analítico”.¹²¹ Con relación a nuestro tema central podemos preguntarnos si el concepto del éter entra dentro de esta categoría. Holton nos dice que en ocasiones los *themata* tienen su antítesis. ¿Cuál es la antítesis del éter? ¿Es el vacío? Éstas son algunas de las preguntas relevantes que surgen en torno a los temas planteados aquí.

2.1.2 Antecedentes históricos en la concepción del éter

Aunque podemos encontrar ideas sobre la constitución de un éter a lo largo de toda la historia, es en el siglo XIX cuando se constituye como una hipótesis central y fundamental para la física. Nuestro tema central, que se desarrollará en la sección 2.2, se localiza en este siglo XIX y parte del XX, pero antes de eso vale la pena referirnos, aunque sea de manera muy breve, a lo ocurrido en tiempos anteriores para identificar contrastes, establecer comparaciones, etc.

¿Cómo vemos? Ésta es una pregunta que ya los antiguos se habían planteado. Según la concepción platónica, en el momento de la visión hay dos polos entre los cuales se forja un eslabón, dos luces en realidad, una interior y una exterior –ahora diríamos del *observador* y lo *observado*- que dan lugar a la percepción. Esto nos habla de una preocupación sintética del yo en el mundo que después de la revolución científica se transformaría en una preocupación por el mundo físico exterior, o en otras palabras, “la vista se convierte en tema de la mecánica más que en la actividad espiritual tan característica de tantos pensadores anteriores”.¹²² Desde la perspectiva de la ciencia moderna, ya no importa tanto la vivencia del fenómeno y lo que se busca es objetivar el mundo externo y teorizar sobre él.

¹²¹ Véase Holton (1998b, p. 8).

¹²² Véase Zajonc (1996, p. 24).

Ya desde Aristóteles encontramos el *horror al vacío*, aunque en el sentido expresado en el párrafo anterior, como necesidad de una conexión entre el sujeto y el objeto. En su forma moderna, este concepto se clarifica con Descartes, para quien es inconcebible el espacio aparte de la materia. Para este filósofo francés, el espacio es un *plenum* capaz de transmitir y ejercer efectos en los cuerpos materiales inmersos en él.¹²³

La historia del éter es a su vez la historia de la luz y de la óptica. Y esta historia sabemos que se caracteriza por la rivalidad entre quienes postulan teorías “emisionistas” y quienes postulan teorías “ondulatorias”. Aunque ya Huygens había sugerido la hipótesis de que la luz es una onda que se propaga en un éter, Newton rechazó esta idea y su teoría corpuscular prevaleció durante más de un siglo, hasta que la pugna resurgió a principios del siglo XIX con Young y Fresnel, quienes se dieron cuenta de que la luz podía ser una onda transversal en vez de longitudinal, con lo cual prácticamente se abandonó el modelo de Newton. Aunque el propio Newton también utilizó la idea de un medio etéreo para poder explicar ciertos fenómenos, la necesidad del éter se hizo en realidad apremiante tiempo después, con las teorías ondulatorias y con la imagen de un mundo mecánico.

El siglo XIX fue heredero por un lado de la Ilustración y por otro del pensamiento romántico. En este contexto, este siglo se caracterizó por una filosofía positivista que le otorgaba a la ciencia la distinción de considerarla como la única portadora de un método para obtener conocimiento válido. Se le atribuía a la ciencia ese poder por sustentarse supuestamente en un tipo de conocimiento basado en la percepción sensible y despreciar hipótesis que no tenían ese correlato sensorial. Paradójicamente, no deja de ser interesante notar que, en los hechos, los científicos del siglo XIX construyeron su visión de la realidad basándose en categorías sin ese claro correlato sensorial, tales como los átomos, los campos, las acciones a distancia, y el éter.¹²⁴

¹²³ Véase Whittaker (1951, vol. 1, p. 5).

¹²⁴ Véase Ordóñez (2001b, pp. 417-418).

En una conferencia que ofreció en el año de 1900, Boltzmann hablaba sobre la hegemonía que la mecánica, entendida como la ciencia del movimiento de los cuerpos, había conseguido sobre el resto de la física a lo largo del siglo XIX. A la mecánica se habían sometido la acústica y posteriormente la óptica, precisamente a raíz de que se considerara a la luz como fenómeno vibratorio. De ahí, nos dice Boltzmann, “se dejó enteramente a la fantasía la construcción de un medio capaz de oscilar, lo que presentó dificultades bastante grandes”.¹²⁵ Algunas de esas dificultades las aborda Ehrenfest en su conferencia de 1912, de la cual nos ocuparemos posteriormente.

2.2 La visión de Ehrenfest en torno al éter

Tratar de entender la ciencia, pero no en su construcción a posteriori, sino en su proceso de hechura, significa rescatar lo que en carne propia vivían los hombres y mujeres directamente involucrados, qué pensaban, cuáles eran sus herramientas de trabajo, cuáles eran sus expectativas en torno a su disciplina, como recibían las nuevas ideas de su comunidad científica, cómo aportaban ellos mismos sus conocimientos, etc. Por eso, como decíamos al principio de este capítulo, es nuestra intención en este espacio introducirnos en la percepción que Paul Ehrenfest tenía sobre el tema del éter alrededor de los años 1911 y 1912 y con eso tener una imagen, a través de uno de los protagonistas del cambio científico, del estado de la crisis que prevalecía en esos tiempos.

Después de vivir por un tiempo en Rusia, de donde era originaria su esposa Tatiana, Paul Ehrenfest se incorporaba, en diciembre de 1912, como nuevo profesor de física teórica en la Universidad de Leiden en sustitución del prestigioso profesor Lorentz. Martín Klein nos dice que, para Ehrenfest, la enseñanza era su verdadera vocación, que tenía el don para “enseñar de tal forma, que lograba poner a sus alumnos en contacto con los temas cruciales de la física lo más pronto posible”.¹²⁶

¹²⁵ Véase Boltzmann (1986, p. 170).

¹²⁶ Véase Klein (1989, p. 30).

En una carta a Lorentz, el profesor Sommerfeld, quien había tenido oportunidad de escuchar una conferencia de Ehrenfest, comentaba sobre él: “(...) sabía cómo presentar las cosas más difíciles de una manera concreta e intuitivamente clara. Los argumentos matemáticos los traduce en imágenes fácilmente comprensibles”.¹²⁷

Sin embargo, Ehrenfest nunca estuvo satisfecho de su capacidad como físico teórico. En una carta a su amigo Joffe, le expresaba su incapacidad para sentarse a trabajar con la intención de lograr algo “significativo”, diciendo que lo único que él había podido lograr era resultado de su impulso por jugar con alguna idea o de su interés en alguna paradoja.¹²⁸ Esta autodescripción resalta y explica su entusiasmo al hablar sobre la crisis del éter lumínico y las contradicciones que presentaba, en la conferencia inaugural que ofreció como nuevo profesor en Leiden.

2.2.1 Ehrenfest y el éter

Con estos antecedentes, ahora estamos ya listos para dejarnos conducir por Ehrenfest y por nuestras propias especulaciones filosóficas, al mundo del éter y su persistente presencia en el mundo de la física clásica. Para conocer el pensamiento de Ehrenfest nos estaremos refiriendo a dos momentos en los que él explícitamente aborda el tema del éter, esto es, a su conferencia inaugural de diciembre de 1912 a la que ya hemos hecho referencia, y a un escrito suyo que data aproximadamente de un año antes en el que hace algunos comentarios en torno a unos planteamientos previos de Albert Einstein de 1909. De aquí en adelante nos referiremos a estas dos fuentes como *la conferencia* y *el artículo*. La conferencia se titula *Zur Krise der Lichtäther-Hypothese* (Sobre la crisis en torno a la hipótesis del éter lumínico) y el artículo *Zur Frage nach der Entbehrlichkeit des Lichtäthers* (Sobre la pregunta en torno a lo superfluo del éter lumínico).¹²⁹

¹²⁷ Citado en Klein (1989, p. 31).

¹²⁸ Carta de Ehrenfest a Joffe, 20 de febrero de 1913, citada en Klein (1985, p. 15).

¹²⁹ El artículo fue presentado originalmente en el *Physikalische Zeitschrift*, volumen 13, pp. 317-319. Tanto la conferencia como el artículo se encuentran en Ehrenfest (1959, pp 303-327), que es la colección de trabajos científicos de Ehrenfest editada por Martin Klein. En esta tesis aparecen ambos documentos traducidos al español en los apéndices 2.1 y 2.2.

En esta sección 2.2.1, nos referiremos al núcleo de la argumentación de Ehrenfest que aparece en su conferencia inaugural, basada en un experimento imaginario, y en la siguiente sección 2.2.2 veremos el desarrollo que hace de sus ideas¹³⁰. Desde su inicio, la conferencia de Ehrenfest muestra esa preocupación tan característica de él por ir a los puntos medulares de su disciplina, al empezar diciendo:

Permítanme hablarles sobre una crisis que actualmente amenaza seriamente una de las hipótesis fundamentales de la física - la hipótesis del éter. Me parece que esta crisis nos da una imagen vívida del característico ambiente revolucionario que domina de momento a la física teórica.¹³¹

Inmediatamente procede a utilizar un experimento mental que usará a lo largo de su conferencia para mostrar las dificultades, las contradicciones y las paradojas en torno a la hipótesis del éter:

Supongamos que tenemos una enorme esfera vacía ante nosotros. Mucho más grande que la Tierra, mucho más grande que la órbita de la Tierra. Tan grande, que un rayo de luz necesitaría cerca de dos horas para atravesarla. Exactamente en el centro de la esfera se encuentra un experimentador. La esfera se encuentra en reposo ante nosotros. El experimentador hace el siguiente experimento: permite que una lámpara muy brillante se encienda por un instante, y espera para ver qué pasa. Primero él ve por un instante la lámpara. Después permanece oscuro por dos horas. Esto es porque la luz viaja durante una hora desde el centro hasta la pared interna de la esfera hueca, y después de reflejarse, necesita otra hora para regresar a donde está el experimentador. Enseguida el experimentador ve iluminarse simultáneamente la pared interna de la esfera por un momento. Luego, todo queda oscuro de nuevo.

Ahora supongamos que se nos da una segunda esfera, idéntica a la primera. Y otra vez, justo en el centro de la esfera, tenemos un experimentador.

¹³⁰ Parte de nuestro análisis de la conferencia está basada en la descripción que Klein hace de este momento clave de la vida de Ehrenfest, en el capítulo 1 de su biografía. Véase Klein (1985, pp. 1-5).

¹³¹ Véase el apéndice 2.1 de esta tesis, p. 192. Todas las citas de Ehrenfest en la sección 2.2 provienen de *la conferencia y el artículo*, pero a este último no se hará referencia hasta que lleguemos a la sección 2.2.3.

Pero esta segunda esfera no está en reposo, sino que se mueve a una enorme velocidad, por ejemplo a la décima parte de la velocidad de la luz. El experimentador viaja con ella. El experimentador debe ahora también, exactamente del mismo modo que el primero, dejar encendida por un instante una lámpara brillante, e igualmente, observar qué pasa. Preguntamos: ¿ve el experimentador en la esfera en movimiento también alumbrarse toda la superficie interna en el mismo instante o ve otra cosa? Los físicos de diferentes épocas habrían respondido de formas variadas a esta pregunta.¹³²

En un interesante artículo, Thomas Kuhn argumenta sobre la función de los experimentos imaginarios a los que, según su opinión, los historiadores de la ciencia deben reconocer como instrumentos valiosos para llegar a una mejor comprensión de la naturaleza.¹³³ Estos experimentos normalmente se sitúan en el centro de un momento de crisis producido por la insatisfacción de ciertas expectativas o la presencia de anomalías persistentes. Según Kuhn, los experimentos mentales tratan a veces de situaciones que no se han examinado en el laboratorio; en otras ocasiones, abordan situaciones que no pueden examinarse físicamente y probablemente ni siquiera pueden darse en la naturaleza. Para Ehrenfest, su experimento es en realidad una versión grotesca de un experimento real, el realizado en 1887 por Michelson y Morley, pero que le permite presentar de una manera más vívida la controversia que suscitan los resultados “negativos” de dicho experimento.

Kuhn nos dice en su artículo que para que un experimento imaginario sea eficaz, se requiere que, de entrada, nada en el experimento resulte desconocido o extraño, es decir, que sus suposiciones iniciales se tienen que ajustar al aparato mental previo de quienes acuden al experimento y que sólo de esa manera puede contribuir a promover una reforma del pensamiento que dé salida a la crisis. Pero, ¿cuáles son esas suposiciones iniciales en el experimento de Ehrenfest y cuáles son las posibles salidas a la crisis de la hipótesis del éter? Si leemos con cuidado los párrafos iniciales de la conferencia presentados anteriormente, vemos que uno de los puntos de partida es creer que hay una condición de reposo privilegiada, ya que más

¹³² Véase el apéndice 2.1 de esta tesis, pp. 192-193.

¹³³ Véase Kuhn (1982).

adelante en su conferencia, al introducir la idea del éter de Fresnel, nos dice que “el éter [estaría] en reposo con respecto a las estrellas fijas”.¹³⁴ Sin embargo, siguiendo de nuevo a Kuhn, para que un experimento mental sea eficaz, los datos indispensables para que ocurra la revolución deben haber existido “en el borde de la conciencia científica”.¹³⁵ El experimento mental es una herramienta en el proceso de las revoluciones científicas para que lo que se conocía de manera vaga y periférica, se entienda luego con nueva precisión en la visión del mundo que reemplaza a la anterior. En el caso que ocupa a Ehrenfest, esto se manifiesta en cierta forma, como veremos más adelante, cuando al final de su conferencia habla de las nuevas teorías (en particular se refiere a la de Einstein y a la de Ritz) que proponen prescindir del concepto del éter.

La historia de la ciencia nos ha mostrado la tendencia de la comunidad científica a extender el contenido de sus disciplinas en torno al paradigma existente, evitando cambios revolucionarios, al menos hasta que la acumulación de anomalías sin solución satisfactoria dentro de los estándares de las teorías aceptadas sea ya insostenible. Es decir, es muy difícil para el científico cambiar su aparato mental aún cuando los nuevos datos consistentemente pidan un cambio de concepción. Es lo que Holton llama “suspension of disbelief”, ese proceso en el que el científico asume una serie de creencias que paradójicamente le dan continuidad a una disciplina, pero a su vez juegan un papel esencial en los momentos cruciales.¹³⁶

2.2.2 Pugna entre teorías

Volvamos a la conferencia de 1912. Ehrenfest se propone comparar las diferentes teorías de la luz, analizando cómo contestarían a la pregunta que plantea en su experimento mental: ¿Ve el experimentador en la esfera en movimiento también alumbrarse toda la superficie interna en el mismo instante, o ve otra cosa? Por un lado contrasta entre teorías emisionistas y ondulatorias, y dentro de las ondulatorias,

¹³⁴ Véase el apéndice 2.1 de esta tesis, p. 193.

¹³⁵ Véase Kuhn (1982, p. 287).

¹³⁶ Véase Holton (1998c, p. 12).

donde el éter juega un papel más fundamental, la distinción entre quienes asumen un éter rígido, estacionario, y quienes consideran que el éter es “arrastrado” por los cuerpos en movimiento, de manera análoga a como la atmósfera de la Tierra se mueve junto con ella.

Newton, con su teoría de la emisión de la luz, y Stokes, con la teoría de un éter que es arrastrado, contestarían que el experimentador en movimiento vería lo mismo que el que está en reposo. En cambio, Fresnel con la teoría de un éter rígido diría que el experimentador de la esfera en movimiento ve algo muy diferente. Según Ehrenfest,

En primer lugar ve la lámpara, luego estará oscuro por aproximadamente dos horas, pero luego verá primero iluminarse el ecuador de la esfera (así llamado el círculo más grande de la esfera perpendicular a la dirección de movimiento de la esfera), posteriormente se iluminarán dos círculos de latitud simétricos al ecuador. Estos círculos se moverán simétricamente hacia los polos. Finalmente se iluminarán simultáneamente los polos de la esfera y luego quedará oscuro de nuevo.¹³⁷

Esto, explica Ehrenfest, resulta de un cálculo elemental basado en la teoría de Fresnel, y que considera el hecho de que al moverse la esfera a través del éter rígido, “los rayos de luz de la lámpara se propagan como ondas circulares y (...) estas ondas circulares son arrastradas por el viento del éter que sopla a través de la esfera-laboratorio”, de tal forma que “la propagación y la reflexión de las ondas de luz ya no transcurren tan simétricamente desde el centro de la esfera hueca”.¹³⁸

Tanto la teoría del éter rígido de Fresnel como la del éter que es arrastrado de Stokes pertenecen en realidad al mismo *programa de investigación*, usando el lenguaje de Lakatos. El *núcleo* de dicho programa de investigación son las leyes del movimiento de Newton, a partir de las cuales se intenta construir una imagen mecánica del mundo. Dentro de la *heurística negativa* de la que habla Lakatos, las diferentes teorías del éter jugarían un papel importante al tratar de explicar una serie

¹³⁷ Véase el apéndice 2.1 de esta tesis, p. 193.

¹³⁸ Ibid., p. 194.

de fenómenos conocidos que tienen que ver con la luz, sin rechazar los supuestos mecánicos básicos.

Ehrenfest continuaba explicando en su conferencia que la teoría del éter había conseguido una posición de dominio casi total dentro de la física, sobre todo después de los trabajos de Maxwell, que mostraban a los fenómenos de la luz como un caso especial de los fenómenos electromagnéticos, alcanzando el éter el status de portador de todos los fenómenos electromagnéticos y no sólo los lumínicos. Hertz había transferido la hipótesis de Stokes del éter que es arrastrado a la totalidad de los fenómenos electromagnéticos, mientras que Lorentz había hecho lo propio con la hipótesis del éter rígido de Fresnel. En general, se puede decir que esta última teoría fue la que prevaleció entre los físicos.

Decíamos en una sección anterior que, según Lakatos, el papel del experimento es el de contrastar dos o más teorías oponentes que forman parte de un mismo programa de investigación, una de las cuáles saldrá victoriosa de acuerdo a los resultados de los experimentos. Es decir, para Lakatos el experimento está al servicio de la teoría. Pues bien, Ehrenfest se pregunta: “¿Cuál fue el momento decisivo para la victoria que la teoría de Fresnel-Lorentz del éter rígido obtuvo sobre la teoría de Stokes-Hertz del éter móvil?”.¹³⁹ Después de relatar cómo las mediciones de aberración de la luz estelar y los experimentos de Fizeau hicieron que los físicos se decidieran por la teoría del éter rígido, Ehrenfest nos conduce al momento de la crisis haciéndonos regresar a su experimento imaginario. Nos recuerda que si hemos de creer en la triunfante hipótesis del éter rígido, entonces “el experimentador en la esfera móvil – debido al viento del éter que fluye por la esfera – vería algo totalmente diferente que el experimentador de la esfera en reposo”.¹⁴⁰ Sin embargo, nos dice, en cierto sentido “Michelson ha ejecutado directamente nuestro experimento de la esfera”¹⁴¹ pero con un aparato de unos cuantos metros de extensión, y no encontró ningún retraso que correspondiera a la iluminación desigual de nuestra esfera.

¹³⁹ Ibid., p. 196.

¹⁴⁰ Ibid., p. 197.

¹⁴¹ Ibid., p. 198.

Nosotros podemos agregar que se han dicho muchas cosas sobre el controvertido experimento de Michelson y Morley y se ha citado en repetidas ocasiones como una prueba definitiva para rechazar el éter. También sabemos que muchas de estas interpretaciones, al igual que con muchos otros experimentos, se han dado en retrospectiva y que, como nos dice Hacking, seguramente su historia no tiene nada que ver con “poner a prueba a Newton y a Einstein”.¹⁴² No nos detendremos mucho en esto, pero sí queremos mencionar, porque viene al caso, que al lado de filósofos como Lakatos y como Popper con una marcada tendencia explicativa centrada en la teoría, tenemos otros pensadores, como Ian Hacking, que defienden la idea de que la teoría y el experimento se nutren uno del otro, que no hay una subordinación como la sugiere Lakatos, y que de hecho la experimentación puede tener una vida propia, independiente de la teoría.¹⁴³ En ese sentido, quizá los experimentos de Michelson –porque en realidad fueron varios, empezando en 1881– no estaban pensados para poner a prueba diferentes teorías, sino que tenía sus caminos propios que buscaban medir el movimiento de la tierra con respecto al éter – independientemente de teorías– y poner a prueba nuevos recursos tecnológicos –el interferómetro en este caso particular.

2.2.3 Posibles salidas a la crisis

Con el paso del tiempo se llegó a considerar que la salida correcta a la crisis de la hipótesis del éter viene dada por la teoría de la relatividad especial de Einstein. Sin embargo, en el año en que estamos situados (1912), algunos científicos, por ejemplo

¹⁴² Véase Hacking (1985, p. 283).

¹⁴³ Lakatos es uno de los filósofos de la ciencia que más duramente criticó a Popper en su concepción de los *experimentos cruciales*. Para él, una teoría bien establecida (un *programa de investigación*, en términos lakatosianos) no se viene abajo con un simple experimento. Es decir, según Lakatos, los experimentos cruciales no existen. Él pone como ejemplo precisamente el famoso experimento de Michelson-Morley, considerado comúnmente como el que falsó la teoría del éter. Lakatos muestra que la historia del experimento y del desarrollo de la física en las siguientes décadas nos hacen ver que ese experimento no fue tan “crucial” como a veces se ha considerado. Véase Lakatos (2002, pp. 98-102). También Hacking se ocupó de ese famoso experimento, basándose en parte en Lakatos, pero al mismo tiempo dando una explicación diferente a éste. Véase Hacking (1985, pp. 282-289). Del mismo modo, podemos encontrar una propuesta en la misma dirección, para el desarrollo de una filosofía de la experimentación, en Ferreiros & Ordóñez (2002).

Arnold Sommerfeld, ya estaban convencidos de esto; pero muchos otros aún no. Al final de su conferencia, Ehrenfest dejará en el aire el sentimiento de que aún no se tiene una solución completamente satisfactoria a la crisis, pero primero describe, con su característico estilo, e identificando los puntos esenciales, algunos de los trabajos realizados en la última década. Después de explicar la preferencia que se había dado por la teoría del éter rígido y de explicar la incongruencia con los resultados de los experimentos de Michelson y otros, Ehrenfest se pregunta: “¿Cómo reaccionaron los físicos a este resultado siempre negativo de todos los experimentos sobre el viento del éter?”.¹⁴⁴ En seguida se dispone a comparar las soluciones dadas por Lorentz, Ritz y Einstein.

Antes de exponer la visión que al respecto tiene Ehrenfest, vale la pena repasar el hecho de que paralelamente a la imagen mecánica del mundo, la física del siglo XIX vio nacer y desarrollarse una imagen de la realidad formada por *campos*. La historia del desarrollo conceptual del campo electromagnético, ligada a nombres como Faraday, Maxwell y Hertz, es muy larga y no la abordaremos aquí,¹⁴⁵ pero sí recordaremos que los campos electromagnéticos, tras estar inicialmente ligados a las características mecánicas del éter, con el paso del tiempo llegaron a adquirir un status independiente de la materia, como campos de fuerza no reducibles a nada más. Ante estos dos programas de investigación, el mecánico y el electromagnético, hubo intentos de cada uno de ellos de absorber al otro. Particularmente, Lorentz desarrolló, partiendo de la teoría de Maxwell, su teoría del electrón, en la que el campo y los corpúsculos eléctricos aparecen como elementos equivalentes en la comprensión de la realidad. Como muestra clara de la persistencia de las ideas científicas, Lorentz no desechó la idea del éter, y es su trabajo el que primero aborda Ehrenfest como un intento de salvar la crisis expuesta anteriormente. Nos sigue explicando Ehrenfest en su conferencia que, según Lorentz, debido al movimiento a través del éter rígido, las fuerzas entre las moléculas e incluso las formas de las partículas cambian, hipótesis que resulta *ad hoc* para explicar que el viento del éter consiga “escondarse” del experimentador, pues

¹⁴⁴ Véase el apéndice 2.1 de esta tesis, p. 198.

¹⁴⁵ Véase por ejemplo Harman (1990, pp. 93-145).

el viento del éter distorsiona el desarrollo del proceso con el que opera el experimentador; además el mismo viento del éter estropea – si se nos permite expresarnos así – los instrumentos de medición de los experimentadores: deforma las reglas, cambia el curso de los relojes, etc. (...) Y si ahora el experimentador observa con sus instrumentos -que el viento del éter ha estropeado- el proceso distorsionado por el mismo viento del éter, entonces verá exactamente lo mismo que vería el observador en reposo con el proceso no distorsionado y los instrumentos no estropeados.¹⁴⁶

Así, un efecto cancela al otro, no se puede detectar el viento del éter y ¿se salva la hipótesis del éter!, de cuya existencia muchos científicos no se atrevieron a dudar. Ante esta conclusión a la que Ehrenfest nos lleva, podríamos agregar a nuestra reflexión la pregunta sobre las implicaciones que podría tener esto desde la perspectiva de la filosofía de la ciencia de Karl Popper. Si el viento del éter es indetectable, no estaría sujeto a la falsación de la que habla Popper y tal vez quedaría catalogado desde esta perspectiva como un *concepto no científico*.¹⁴⁷ Pero por lo pronto dejemos de lado este pensamiento.

En cuanto al experimento de la esfera, continúa Ehrenfest,

tomando como fundamento la hipótesis de que el viento del éter distorsiona las fuerzas moleculares, calculamos que el viento del éter ha deformado la enorme esfera, y aunque la volteemos siempre estará aplastada en la dirección del movimiento: los polos quedan ahora más cerca del centro que el ecuador, en cantidad tal que el experimentador ahora sí ve iluminarse los polos exactamente al mismo tiempo que el ecuador. Exactamente como era el caso del experimentador de la esfera en reposo.¹⁴⁸

Es decir, las dimensiones de la esfera sufren una contracción en la dirección del movimiento, de manera que el tiempo adicional que le costaría a la luz viajar en esa dirección se compensa por la menor longitud a recorrer.

¹⁴⁶ Véase el apéndice 2.1 de esta tesis, p. 199.

¹⁴⁷ Aquí podríamos hacer un análisis profundo sobre la *visión instrumental* versus la *visión realista* de la ciencia, lo cual nos llevaría a cuestiones interesantes de filosofía de la ciencia y de teoría del conocimiento. Sin embargo, ese análisis se sale del propósito del presente trabajo.

¹⁴⁸ Véase el apéndice 2.1 de esta tesis, p. 200.

La explicación de Lorentz no requiere deshacerse del éter, pero sí privarlo de sus características mecánicas y proclamar así una concepción electromagnética de la naturaleza. Para Lorentz sigue existiendo un sistema de referencia preferencial del éter, pero aún así logra explicar los fracasos recurrentes al intentar detectar el movimiento de la Tierra a través del éter.

Aunque las ideas de Lorentz tuvieron mucha influencia, y según dice Ehrenfest en su conferencia, nos muestran algunas posibles salidas a la crisis, no todos los físicos estaban satisfechos. Entre ellos se encontraban dos amigos cercanos de Ehrenfest, Walter Ritz y Albert Einstein. Ritz había muerto muy joven, en julio de 1909, y no pudo desarrollar plenamente sus ideas, pero está claro que Ehrenfest las tenía en muy alta estima. Aproximadamente un año antes de su conferencia, escribió el artículo al que hemos hecho referencia al iniciar la sección 2.2.1, en el que desarrolla algunas de las ideas de Ritz contrastándolas con las de Einstein, a partir de un planteamiento de éste último, que a Ehrenfest le parecía contradictorio. Analizaremos parte de ese artículo y después veremos cómo las ideas que trabajó Ehrenfest en él, las seguía teniendo presentes en su conferencia.

En ese artículo de 1911¹⁴⁹, Ehrenfest cita un párrafo escrito por Einstein en un número anterior de la misma revista¹⁵⁰ en el que expresa la idea de que es posible renunciar a la hipótesis del éter y considerar que los campos electromagnéticos que forman la luz no son una perturbación de un medio hipotético, sino que están compuestos de entidades independientes que son emitidas por las fuentes de luz como sucede en la teoría de emisión newtoniana. Ehrenfest se encuentra a disgusto con esta afirmación, pues le parece incompatible con uno de los postulados de Einstein de su teoría de la relatividad, que dice “(...) que la luz en el espacio vacío siempre se propaga con una velocidad V fija independiente de las condiciones de movimiento de los cuerpos emisores”.¹⁵¹ A este postulado, Ehrenfest lo identifica

¹⁴⁹ Recordemos que estamos hablando de *Zur Frage nach der Entbehrlichkeit des Lichtäthers* (Sobre la pregunta en torno a lo superfluo del éter lumínico), publicado en el *Physikalische Zeitschrift*, volumen 13.

¹⁵⁰ *Physikalische Zeitschrift*, volumen 10.

¹⁵¹ Véase el apéndice 2.2 de esta tesis, p. 208.

como [D]¹⁵². Para que se cumpla este último postulado, habría que tomar con reservas la comparación que hace Einstein con la teoría de emisión newtoniana, pues nos llevaría a que “la cinemática de los impulsos de luz emitidos ya no se da en la forma simétrica que ocurre en la teoría de emisión de Newton, sino con una simetría con la intensidad exacta que haga que se cumpla el postulado [D].”¹⁵³ El problema parece consistir en definir qué entendemos por “teoría de emisión de los fenómenos óptico-electromagnéticos”,¹⁵⁴ que Ehrenfest prefiere reservar para las teorías en las cuales la velocidad de la fuente de luz se suma a la velocidad de la luz emitida. Y esto es precisamente lo que había intentado Walter Ritz poco antes de morir al desarrollar una teoría de emisión que no requiriera de contracciones de los cuerpos rígidos ni cambios en el curso de los relojes. Para Ritz, y parece que también para Ehrenfest si nos atenemos a sus conclusiones en el artículo, la hipótesis de Einstein de la constancia de la velocidad de la luz no nos muestra sino “remanentes de la hipótesis del éter que de otra manera ya estaría totalmente eliminada”,¹⁵⁵ pues esa velocidad de la luz no es otra sino la velocidad de la luz en el éter proveniente de las teorías de Maxwell y de Lorentz. Así, al comparar las propuestas de Einstein y Ritz, y dejando la puerta abierta a una solución satisfactoria por falta de resultados experimentales que confirmen una u otra, Ehrenfest concluye que “los seguidores de la hipótesis del éter deben desear que el postulado [D] se cumpla a cabalidad”.¹⁵⁶

Regresando a la conferencia de diciembre de 1912, en la última parte de la misma, cuando se dispone a hablar de las propuestas de Ritz y Einstein, resulta claro que tenía muy presente sus preocupaciones previas y lo que él había expuesto en su artículo cerca de un año antes. En la conferencia, aunque de nuevo muestra a Einstein como heredero de las ideas de Maxwell y Lorentz, Ehrenfest se encarga de resaltar vívidamente la diferencia con este último. Nos dice:

¹⁵² En su artículo, Ehrenfest enumera con letras las distintas hipótesis, supuestos y postulados que manejan Einstein y Ritz en sus respectivas ideas sobre la luz y el éter, para poder analizar las consecuencias de ambas teorías de una manera más cómoda.

¹⁵³ Véase el apéndice 2.2 de esta tesis, p. 208.

¹⁵⁴ Ibid., p. 209.

¹⁵⁵ Ibid., p. 209.

¹⁵⁶ Ibid., p. 212.

Tomemos una fuente de luz A en reposo para nosotros y una segunda fuente de luz B que corre con velocidad mayor con respecto a nosotros. Dejemos que los rayos de luz de ambas fuentes vayan por un tubo vacío, que para nosotros está en reposo y midamos si ambos rayos de luz viajan por el tubo con la misma rapidez o no. ¿Qué resultado tendremos?¹⁵⁷

Tanto la teoría de Lorentz como la de Einstein responden que se tendrá la misma rapidez¹⁵⁸, pero para Lorentz esto es “porque la luz de ambas fuentes de luz se propagan en uno y el mismo éter”, en tanto que para Einstein es así sin necesidad de dar ninguna razón, pues “Einstein pone esta declaración más bien como postulado a la cabeza de su teoría”.¹⁵⁹

Tanto en su artículo como en la conferencia, Ehrenfest se muestra escéptico respecto al tratamiento einsteniano. En el artículo se pregunta: “¿Es este punto de vista ‘físicamente satisfactorio’? ¿o está uno ‘autorizado’, si no es que ‘obligado’, a requerir una explicación de ‘por qué’ los impulsos de luz en el espacio vacío se dispersan con la asimetría exacta, de manera que se cumpla el postulado [D]?”.¹⁶⁰ Recordemos que el postulado [D] es el de la constancia de la velocidad de la luz. En sus agudas preguntas se vislumbra la necesidad interna de Ehrenfest por proveer de plausibilidad física a las teorías. Ya casi al final de su conferencia, nos informa sobre los tres puntos a los que nos debemos suscribir si hemos de aceptar los puntos de vista de Einstein. El primero es que debemos aceptar que la luz emitida por las fuentes aparece como entidad independiente de la existencia de un éter. El segundo es que la velocidad de la luz es la misma independientemente del movimiento de las fuentes de donde proviene la luz. Y tercero, como no convencido de la compatibilidad de los anteriores, es que debemos declarar que nos satisface la combinación de los dos puntos anteriores.

¹⁵⁷ Véase el apéndice 2.1 de esta tesis, p. 201.

¹⁵⁸ El uso en este artículo de los términos *velocidad* y *rapidez* no es gratuito. En la conferencia, se usa mucho el término *Geschwindigkeit*, que es lo que más directamente podríamos traducir como *velocidad*. Sin embargo, en el fragmento donde hablamos de *misma rapidez*, en el original en alemán podemos leer *Gleich rasch*, que más literalmente se traduciría como *igual de rápido*. Ehrenfest lo está usando aquí como otra forma de decir que tienen la misma velocidad.

¹⁵⁹ Véase el apéndice 2.1 de esta tesis, p. 201.

¹⁶⁰ Véase el apéndice 2.2 de esta tesis, pp. 208-209.

Martin Klein nos explica que la dificultad de Ehrenfest en esta lucha interna por comprender las propuestas de Einstein estriba en que Ehrenfest trataba de dar una *justificación epistemológica* a la teoría de Einstein de 1905 por medio de la no existencia del éter, en tanto que Einstein había basado sus argumentos “en la equivalencia *empírica* de todos los sistemas inerciales con respecto a la luz”¹⁶¹. Es interesante mencionar que esta insatisfacción con las propuestas de Einstein prevalece más adelante con la teoría general de la relatividad. Después de haber cultivado una gran amistad en la que se permitían hablarse con mucha confianza, en una carta Ehrenfest le cuestiona: “Einstein, mi irritado estómago odia tu teoría – ¡casi te odia a ti mismo! ¿Cómo puedo enseñar a mis alumnos? ¿Qué les voy a responder a los filósofos?”.¹⁶²

Ehrenfest termina su conferencia con una rápida referencia “al conjunto confuso de problemas, al cual usualmente marcamos ahora con la expresión «cuanto de luz»”,¹⁶³ sugiriendo que esas nuevas ideas podrían tener un papel decisivo en la solución a la crisis de la hipótesis del éter, pero de momento deja a su audiencia con el sentimiento de que cosas muy interesantes están por venir en el desarrollo de la física.

2.3 ¿Muerte de la hipótesis del éter?

Aunque habían intercambiado correspondencia desde hacía algún tiempo, Ehrenfest y Einstein se conocieron personalmente en Praga en febrero de 1912 (diez meses antes de la conferencia de Ehrenfest a la que hemos hecho referencia en este artículo) y a partir de ahí cultivaron una gran amistad. Los unieron sus mismos intereses científicos, su común ascendencia judía, su gusto por la música, etc. En noviembre de 1919, Ehrenfest le comunicaba a Einstein su tentativa para ofrecerle una posición como Profesor Especial en Leiden que podría significar tenerlo cerca por tres o cuatro meses cada año. Estos planes se concretaron casi un año después y Einstein

¹⁶¹ Véase Klein (1985, p. 135).

¹⁶² Carta de Ehrenfest a Einstein, 24 de noviembre de 1919, citada en Klein (1985, p. 315).

¹⁶³ Véase el apéndice 2.1 de esta tesis, p. 203.

ofreció su conferencia inaugural en Leiden bajo el título de *El éter y la teoría de la relatividad*, en la cual podemos encontrar, para nuestra sorpresa, la resurrección del éter.¹⁶⁴

Como vimos, de alguna manera Ehrenfest ya había anticipado ocho años antes que el éter no había sucumbido del todo, pese a todos los experimentos que intentaron inútilmente detectar el viento del éter y pese a que Einstein, en su *Zur Elektrodynamik Bewegter Körper* (Sobre la Electrodinámica de los Cuerpos en Movimiento) de 1905, había declarado que “la introducción de un «éter lumínico» se mostrará superflua, puesto que la idea que se va a desarrollar aquí no requerirá de un «espacio en reposo absoluto»”.¹⁶⁵

Sin embargo, en su conferencia de 1920, Einstein prefiere matizar su visión del éter a la luz de sus últimas investigaciones. En efecto, nos dice Einstein, con Lorentz aún se tenía un éter al cual se le había despojado de todas sus cualidades mecánicas, excepto su inmovilidad. Los físicos se deshicieron de él pues resultaba “inaceptable” e “intolerable” esa asimetría en la estructura teórica sin una asimetría correspondiente en el sistema de experiencia (la equivalencia *empírica* de todos los sistemas inerciales con respecto a la luz, a la cual nos habíamos referido en la sección anterior). Sin embargo, nos dice Einstein, “la teoría especial de la relatividad no nos obliga a negar el éter” siempre y cuando no se le quiera asignar un estado definido de movimiento –la inmovilidad-, es decir, se puede conservar el éter pero retirándole el último atributo mecánico que Lorentz le había dejado. Después de todo “hay un argumento de peso que se puede aducir a favor de la hipótesis del éter (...) negar el éter es en última instancia afirmar que el espacio no tiene ningún tipo de cualidad física (...) y los hechos fundamentales de la mecánica no armonizan con este punto de vista”. Mas aún, con la teoría general de la relatividad, el concepto del éter “ha

¹⁶⁴ Esta interesante conferencia se puede encontrar en el libro *Sidelights on relativity* (Einstein, 1983), donde se recogen dos conferencias de Einstein: “Ether and relativity”, a la cual nos estamos refiriendo aquí y de donde están tomadas las citas de este apartado, y “Geometry and experience”. También se puede consultar esa conferencia de 1920 en la siguiente dirección de Internet: http://www.mountainman.com.au/aether_0.html (traducción al inglés). Se encuentra también una pequeña parte de la conferencia en http://www.alberteinstein.info/PDFs/CP7Doc38_pp305-309_321.pdf (original en alemán).

¹⁶⁵ Cita tomada de la traducción al español en Stachel (2001, p. 112).

adquirido de nuevo un contenido inteligible, aunque este contenido difiere ampliamente del éter de la teoría de la luz mecánico ondulatoria (...) el continuo espacio-tiempo posee cualidades métricas y en ese sentido se puede seguir hablando de un éter”.

En resumen, ante nuevas conjeturas que abrieron la posibilidad de una nueva interpretación del espacio y el tiempo, “el éter revive con un ropaje más sutil e inmaterial”,¹⁶⁶ o como el mismo Einstein llegó a decir, esa arquitectura inmaterial del espacio-tiempo de su teoría de la relatividad, podía entenderse como una especie de *éter rehabilitado*. Con Einstein, la luz se concibe como una onda electromagnética, pero sin un medio material que soporte su movimiento. El éter había perdido su último vestigio de materialidad, pero se le podía recuperar como elemento determinante de las relaciones métricas en el continuo espacio-tiempo.

2.4 Conclusiones

La historia del éter, las luchas conceptuales en torno a él y la vívida imagen que de todo ello hemos obtenido analizando la conferencia y el artículo de Ehrenfest pueden servirnos como ejemplo de la forma en que progresa la ciencia. Se mencionaba en un apartado anterior cómo las creencias científicas juegan un papel muy importante en los momentos cruciales. Gerald Holton nos sugiere que las innovaciones surgen de un balance entre las creencias o *themata* que por un lado comparten los científicos y que les permite comunicarse significativamente, y por otro las diferencias que representan esa libertad intelectual y que da lugar a las nuevas ideas.¹⁶⁷ En la búsqueda por alguna salida a la crisis de la hipótesis del éter lumínico, la lectura que hace Ehrenfest del tema nos permite recorrer algunas de las ideas de Lorentz, Ritz, Einstein y otros científicos en un momento histórico en el que todas las ideas, viejas y nuevas, estaban en juego en el campo de su disciplina, donde la movilidad y el avance en la comprensión del mundo físico estará dictado por ese fino balance de

¹⁶⁶ Véase Zajonc (1996, p.272).

¹⁶⁷ Véase Holton (1998c, p. 26-27).

temas que definen las imágenes del mundo del científico. Einstein mismo consideraba su trabajo no tanto como revolucionario, sino como resultado de una evolución natural de lo que previamente había sido edificado por Maxwell y Lorentz. Y es que, en efecto, Einstein compartía con ellos ciertas creencias o presuposiciones en el sentido de que la realidad física debía describirse en términos de entidades continuas (los campos), aunque difería de ellos en otros aspectos, por ejemplo en el papel que debería jugar el éter.

A la luz de la física moderna, podría decirse que el éter no existe, que fue una ficción hipotética nacida de la imaginación materialista. Pero desde una perspectiva histórica, como lo vimos a través de este emocionante recorrido por el que nos dejamos llevar de la mano de Paul Ehrenfest, el éter fue a lo largo del siglo XIX y parte del XX un concepto muy persistente en la mente de los científicos como forma de hacer inteligible muchos fenómenos físicos a través de una visualización mecánica tan característica de esos tiempos. La física clásica veía al mundo inanimado como regido por las leyes mecánicas de Newton y las leyes electromagnéticas de Maxwell, y dentro de esa imagen del mundo físico, el éter jugó un papel esencial que prevaleció por mucho tiempo, dada la inclinación de los físicos por proteger el corpus del conocimiento de su disciplina como existía en el momento. Pero al final, las incompatibilidades entre la mecánica newtoniana y las leyes del electromagnetismo llevaron a hombres como Einstein y otros a sugerir nuevos caminos y a arriesgarse a imaginar nuevas posibilidades, guiados por la creencia de que el mundo tiene una estructura unitaria.

3 La mecánica estadística: sus orígenes y sus paradojas a la luz de los escritos de Paul y Tatiana Ehrenfest

Un libro de texto estándar de mecánica estadística¹⁶⁸ define a esta disciplina como la ciencia de predecir propiedades observables de un sistema formado por muchos cuerpos, estudiando las estadísticas del comportamiento de sus constituyentes individuales, ya sean estos átomos, moléculas, fotones, etc.¹⁶⁹ Esto significa que de manera natural, la mecánica estadística aparece como eslabón entre las ciencias que se ocupan del mundo macroscópico y que lo tratan como continuo -como es el caso de la termodinámica- y las ciencias que se ocupan del mundo microscópico y reconocen a la naturaleza como compuesta de partículas discretas. El desarrollo de esta disciplina constituyó un gran triunfo de científicos del siglo XIX como Clausius, Maxwell y de manera muy especial Boltzmann.

Como disciplina científica, la mecánica estadística presenta situaciones problemáticas desde el punto de vista filosófico y epistemológico, ya que sus “verdades” dependen de nociones probabilísticas y la función que éstas juegan en su tarea explicativa de los fenómenos. Boltzmann, uno de los fundadores de la mecánica estadística, y de quien Paul Ehrenfest fue discípulo, tenía una especial preocupación por las cuestiones filosóficas en torno a los temas que él manejaba. En una conferencia que ofreció en 1904 titulada *Sobre la mecánica estadística*, le dedica más de la mitad del tiempo a sus divagaciones filosóficas antes de entrar propiamente en el tema de su plática, pues él mantenía la “esperanza de que la colaboración entre la filosofía y las ciencias de la naturaleza dé a ambas nuevas perspectivas”.¹⁷⁰

¹⁶⁸ Véase por ejemplo Glazer & Wark (2001).

¹⁶⁹ En este sentido, habría que distinguir entre la mecánica estadística clásica y la mecánica estadística cuántica. En este trabajo nos referimos principalmente a la primera, asumiendo que los constituyentes individuales referidos obedecen las leyes de la mecánica clásica, y sólo se hará breve referencia a la segunda hacia el final del escrito, tomando en cuenta que el desarrollo de la mecánica estadística clásica representa el antecedente inmediato de las ideas cuánticas, sobre las cuales Paul Ehrenfest también tuvo cosas importantes que decir.

¹⁷⁰ Véase Boltzmann (1986, p. 225).

Dentro del pensamiento filosófico del siglo XIX, ejerce una gran influencia el positivismo. Una manera concisa de recapitular esta corriente de pensamiento es atendiendo a los siguientes tres criterios: un rechazo a las explicaciones metafísicas, la convicción de que la ciencia constituye la verdadera y única forma de conocimiento y una interpretación particular de esa verdadera ciencia en el sentido de restringirse al descubrimiento y descripción de correlaciones de la experiencia.¹⁷¹ Sin embargo, es claro que muchos físicos no siguieron los consejos del positivismo. Por ejemplo, regresando a la conferencia de Boltzmann que se mencionaba en el párrafo anterior, vemos que él se refiere a la mecánica estadística (asociada desde luego a su visión atomística) como una disciplina en la que no se puede negar la existencia de elementos hipotéticos y declara que esa ciencia “es una imagen que trasciende audazmente los puros hechos de observación”, pero la defiende diciendo que dichas hipótesis “arrojan nueva luz sobre ciertos aspectos particulares de los hechos observados”.¹⁷²

Después del desarrollo de la mecánica estadística en el siglo XIX y ante la crisis de las ciencias físicas a principios del siglo XX, la presencia de científicos críticos de su propia disciplina resultó muy importante. Uno de estos científicos es Paul Ehrenfest, quien como discípulo de Boltzmann tuvo un gran interés en la mecánica estadística. En este capítulo nos proponemos hacer una revisión del estado que guardaba esa disciplina desde la perspectiva de la crítica de Paul Ehrenfest y su esposa Tatiana y de su propio trabajo en torno a dicha ciencia en los primeros años del siglo XX, atendiendo de manera especial a las paradojas y controversias que generó.

¹⁷¹ Véase por ejemplo, Mandelbaum (1980, pp. 6-8). Este autor hace además una distinción en el sentido de hablar de las formas sistemática (Comte, Spencer) y crítica (Mach) del positivismo, entendiendo esta última como análisis de los fundamentos del conocimiento.

¹⁷² Véase Boltzmann (1986, p. 212).

3.1 Bosquejo histórico de la mecánica estadística

Existe una amplia literatura sobre la historia de la mecánica estadística, de manera que no es este el lugar para hacer una extensa revisión sobre el tema, pero sí queremos, de manera muy esquemática, mencionar algunos momentos decisivos de dicha historia, destacando las ideas de las cuales se ocuparían Paul Ehrenfest y su esposa, en los primeros años del siglo XX. A Paul Ehrenfest le tocó vivir, como físico teórico, momentos decisivos en el desarrollo de su disciplina, en los cuales se vivieron momentos de crisis que finalmente llevaron a un radical proceso de transición en la comprensión del mundo físico. Ehrenfest fue muy respetado por su comunidad científica, pero él particularmente sufría de baja autoestima en relación con su trabajo, en el sentido de sentirse incapaz de desarrollar de manera profunda una línea de pensamiento. Este sentimiento acompañó a Ehrenfest incluso ya en una etapa muy madura como físico teórico y en repetidas ocasiones lo expresaba con sus amigos. Por ejemplo, en cartas dirigidas a Einstein con motivo de una visita de éste a la Universidad de Leiden (donde trabajaba Ehrenfest), manifestaba su inseguridad diciendo: “estoy muy, muy deprimido – en parte debido a las eternas preocupaciones (¡¡¡menores!!!) de dinero, en parte porque no estoy haciendo nada de trabajo. Lo que puedo hacer, no es ciencia, sino sólo un poco de conversación de entretenimiento de salón o de pasillo acerca de la física – la física hecha por otros”¹⁷³ y en su relación con quienes él consideraba “grandes”, decía sentirse como “una inocua e indefensa rana temerosa de ser aplastada”.¹⁷⁴ Pero eso sí, se sentía sumamente atraído por las paradojas que presentaba en esa época el desarrollo de la física teórica, y lo apasionaba ocuparse de ellas, contribuyendo a promover un espíritu crítico y reflexivo en su disciplina. Por eso, nuestra breve revisión histórica, así como los planteamientos de carácter filosófico de la siguiente sección se centran principalmente en esos elementos que para Ehrenfest resultaban más fundamentales y de mayor interés.

¹⁷³ Carta de Ehrenfest a Einstein, 6 de agosto de 1920, citada en Klein (1985, p. 319).

¹⁷⁴ Carta de Ehrenfest a Einstein, 16 de agosto de 1920, citada en Klein (1985, p. 319).

Decíamos en la introducción que la mecánica estadística aparece como una herramienta teórica que conectaría el mundo macroscópico con el microscópico. El antecedente histórico es por supuesto la ciencia del calor, la termodinámica. Suele citarse la obra de Sadi Carnot¹⁷⁵ de 1824 como el punto de partida de la termodinámica como ciencia moderna.¹⁷⁶ Pero esta obra se basa en la teoría del calórico y en ella, aunque se presentan ideas relacionadas con lo que después se llamaría la segunda ley de la termodinámica, éstas son aún incompletas.¹⁷⁷ Una presentación más sistemática de dicha ciencia fue dada por Clausius, en quien ya encontramos una convicción plena de que el calor no es una sustancia, sino una forma de movimiento. Para 1859, se identifica sin duda, en los trabajos de Clausius, una aceptación de la equivalencia entre el calor y el trabajo y una expresión de la segunda ley de la termodinámica de una manera formal y completa, introduciendo el concepto de entropía. Pero más importante para nuestro tema es que encontramos en Clausius las primeras expresiones modernas de la teoría cinética de los gases, es decir, la idea de que las características macroscópicas de un sistema, se pueden explicar en términos de sus constituyentes microscópicos (átomos o moléculas que en un principio eran totalmente hipotéticos y poco a poco fueron adquiriendo el status de entidades “reales”) y las leyes dinámicas fundamentales que los gobiernan. Evidentemente, la lucha por desarrollar y difundir estas nuevas formas explicativas se vería fuertemente atacada por pensadores como Ernst Mach, que defendían una visión fenomenológica de los fenómenos físicos apoyados por las ideas positivistas que habían surgido a lo largo del siglo XIX.

Quienes más tuvieron que luchar contra estas corrientes positivistas que condenaban el uso de hipótesis y de entidades que no tuvieran un correlato sensorial

¹⁷⁵ Para una edición en español véase Carnot (1987).

¹⁷⁶ Se pueden citar además como antecedentes a la obra de Carnot, los siguientes tres elementos: 1. Las investigaciones de científicos como Boyle, Mariotte y Gay-Lussac, cuyo trabajo experimental llevó a establecer las relaciones entre presión, volumen y temperatura de un gas; 2. las discusiones en torno a la teoría del calórico, que considera al calor como una sustancia y a la teoría dinámica que considera al calor como una forma de energía mecánica; y 3. la necesidad de entender y perfeccionar la máquina de vapor. Para mayor detalle ver Purrington (1997, pp. 76-81).

¹⁷⁷ En la obra de Sadi Carnot se establece de manera clara que cuando se hace trabajo en un sistema termodinámico en un proceso cíclico, el calor debe fluir del receptáculo más caliente al más frío, es decir, que se requiere una diferencia de temperatura para hacer trabajo.

directo fueron Maxwell y Boltzmann, a quienes se les reconoce haber puesto las bases de la mecánica estadística. Maxwell introdujo la idea de la distribución estadística de velocidades. Partiendo de unos sencillos postulados, Maxwell logra obtener una expresión para la distribución de las velocidades de las moléculas de un gas cuando está en equilibrio, la cual resulta ser igual a la distribución normal de errores en un proceso de medición, es decir, la conocida función exponencial en forma de campana.¹⁷⁸ Atraído por estas ideas, Boltzmann se propone derivar la segunda ley de la termodinámica usando las leyes de la mecánica a partir del enfoque estadístico de Maxwell. Boltzmann derivó una ecuación integro-diferencial que describe el proceso por medio del cual un gas tiende hacia su condición de equilibrio y mostró cómo ese estado final está caracterizado por la citada ley de distribución de velocidades de Maxwell. La demostración está basada en el efecto que producirían las colisiones entre moléculas¹⁷⁹. Y aquí se encuentra la semilla de los problemas y de las disputas que tuvo que enfrentar Boltzmann, pues la pretensión de estar obteniendo resultados basados en principios mecánicos y los procesos irreversibles a los que se llega (el sistema siempre se mueve hacia el estado de equilibrio) conduce a una serie de paradojas que introduciremos en la siguiente sección y que despertaron el interés de los Ehrenfest, asunto que discuten en varios artículos que analizaremos más adelante. Para combatir a sus críticos, Boltzmann desarrolla aún más sus ideas estadísticas, tratando de que sus conclusiones sean independientes del análisis de colisiones, dándole a su trabajo un carácter totalmente probabilístico. Estos esfuerzos lo conducirían a expresiones equivalentes a la famosa fórmula para la entropía expresada como $S = k \log W$.

¹⁷⁸ De hecho se cree que Maxwell fue influenciado por un escrito de Sir John Herschel en el que se deriva la ley exponencial de los errores (la misma a la que llega Maxwell para la distribución de las velocidades) basado en el hecho de que la función buscada debe cumplir la propiedad de que el producto de dos funciones del tipo buscado, aplicadas a dos variables independientes, debe ser igual a la misma función aplicada a la suma de las variables, es decir $f(x)f(y) = f(x+y)$. Para Maxwell las variables independientes son las componentes ortogonales de las velocidades de las moléculas que colisionan. Para mayor detalle véase Brush (1994, pp. 183-189).

¹⁷⁹ Esa ecuación integrodiferencial, lo condujo al famoso teorema H, donde se define la función H (llamada E por Boltzmann) donde $H = \int f \log f$, siendo f la función de distribución de velocidades. Boltzmann demuestra que H siempre disminuye a menos que f sea la distribución de Maxwell. Si identificamos a $-H$ como la entropía, resulta claro que dicha entropía irá en aumento hasta que el conjunto de moléculas de gas adquiere la distribución de velocidades de Maxwell.

Este enfoque de Boltzmann requiere una explicación más puntual. La nueva noción utilizada por Boltzmann consiste en definir un *microestado* como cada una de las formas posibles en que se puede distribuir una energía total dada del sistema entre sus moléculas, y un *macroestado* como una condición macroscópica (que se puede medir) del sistema termodinámico. A cada macroestado le corresponden varios microestados. Se asume que cada microestado es igualmente probable. En la fórmula mencionada en el párrafo anterior, W es igual al número de microestados que corresponden a ese macroestado, de manera que esa fórmula expresa una relación directa entre entropía y probabilidad del estado termodinámico. Por lo tanto, ésta es una definición totalmente probabilística de la entropía con la cual Boltzmann se defiende de sus oponentes bajo la idea de que la segunda ley de la termodinámica del aumento de la entropía es cierta en un sentido estadístico, no absoluto, es decir, todo sistema se dirige, casi siempre, hacia un estado de equilibrio simplemente porque ese es el estado más probable, al que corresponden mayor número de microestados.

Sin embargo, este enfoque se basa en la suposición mencionada arriba de que todos los microestados son igualmente probables. El siguiente paso será tratar de justificar esto último por medios mecánicos. Se trata de la hipótesis ergódica, que pretende justificar esa equiprobabilidad bajo el supuesto de que el sistema considerado pasa el mismo tiempo en cada uno de los estados accesibles (los compatibles con la energía total), y que como veremos en la sección 6 presenta varios problemas y de la cual se ocupó ampliamente el matrimonio Ehrenfest.

3.2 Filosofía de la mecánica estadística

El título de esta sección no obedece a una intención de hablar de la filosofía de la mecánica estadística en un sentido actual, sino de hacer alusión a una especial actitud de los científicos que estuvieron involucrados en el nacimiento de la mecánica estadística. Nos referíamos en la introducción de este capítulo a la inclinación que tenía Boltzmann por la filosofía. ¿Qué relación guarda la actividad científica con el pensamiento filosófico? ¿Necesitan los científicos una orientación filosófica? Gerald

Holton aborda éstas y otras preguntas en un provocativo ensayo,¹⁸⁰ en el que pone en evidencia cómo la actividad científica de nuestro tiempo no tiene ese influjo iluminador de los debates epistemológicos del pasado. Aunque Holton se refiere principalmente a los grandes debates filosóficos de la primera mitad del siglo XX entre científicos como Bohr y Einstein,¹⁸¹ es claro que ellos fueron herederos de los grandes filósofos-científicos de la última mitad del siglo XIX, hombres como el mismo Boltzmann, Mach, Ostwald, etc. El mismo Einstein, de quien podemos recordar su observación de que “La epistemología sin contacto con la ciencia se convierte en un esquema vacío. La ciencia sin epistemología es – si es que se puede pensar en tal cosa – primitiva y desordenada”,¹⁸² fue fuertemente influenciado por Ernst Mach. En esa lucha entre posiciones fenomenológicas o positivistas por un lado y mecanicistas, materialistas y realistas por otro, Einstein, en una época ya más madura de su vida, se empieza a distanciar de Mach pensando que el papel fundamental que juega la experiencia en la construcción de teorías físicas, se lleva a cabo a través de una recopilación o síntesis creativa de la totalidad de la experiencia física, y no sólo en la suma de esas experiencias, por lo cual ya para ese entonces Einstein se refería a Mach diciendo: “Yo veo su punto débil en el hecho de que creía poco más o menos que la ciencia consistía en poner orden en el material experimental, es decir, que ignoró el elemento constructivo libre en la elaboración de un concepto. Pensaba de alguna manera que las teorías son el resultado de un *descubrimiento* y no de una *invención*”.¹⁸³ Para Einstein, esta manera de pensar de Mach tendría que llevarnos a rechazar la idea de una realidad física.

El pensamiento de Mach en principio nos conduciría a descartar la idea de que la materia está compuesta de átomos que no podemos ver, aunque él no rechazaba del todo la utilidad del atomismo como hipótesis, pero nunca como algo “real”, pues opinaba que lo que nos representamos, existe sólo en nuestro

¹⁸⁰ Véase Holton (1998c, pp. 163-178).

¹⁸¹ Holton habla de estos científicos como verdaderos “portadores y pilares de cultura” (Kulturträger), con el deber y la necesidad psicológica de mostrar una imagen del mundo coherente.

¹⁸² Einstein (1970b, pp. 683-684).

¹⁸³ Carta de Einstein a Besso, del 6 de enero de 1948 en Einstein (1994, pp. 353-354).

entendimiento y su forma varía con el punto de vista de la cultura.¹⁸⁴ Pero es esta idea atomista de la materia la que está en la base de la teoría cinética de los gases y de la mecánica estadística, y en todos los grandes científicos que colaboraron en la construcción del edificio de la mecánica estadística se destaca esa síntesis creativa que va más allá de los fenómenos.

La mecánica estadística, sin embargo, no es sólo una *reducción* de la termodinámica basada en la mecánica Newtoniana y la visión atomista de la materia, como resulta claro de las paradojas conceptuales que se fueron presentando en el curso de su desarrollo. En todo caso, la mecánica estadística es una *extensión* de la termodinámica que adopta criterios probabilísticos de los cuales surgen nuevas connotaciones epistemológicas, nuevas preguntas sobre lo que podemos conocer y cuáles son los fundamentos de ese conocimiento. Los conceptos probabilísticos que se aplican no son sólo en el sentido de utilizar valores promedio de cantidades físicas asociadas a las partículas (velocidad, energía, etc.), que podríamos catalogar también como un concepto mecánico, sino en un sentido más fundamental ligado a ideas de aleatoriedad, posibilidad, etc. De entrada, para establecer una clara diferenciación, es importante entender que cuando hablamos de la física cuántica, las probabilidades aparecen como parte de la indeterminación o al menos la falta de determinismo estricto que caracteriza a esa teoría, pero cuando hablamos de la física clásica, se supone que hablamos de una teoría totalmente determinista cuyas leyes en principio permiten conocer completamente el futuro. Por eso, en este caso, el uso de conceptos probabilísticos resulta más desconcertante.¹⁸⁵ En esa extraña mezcla de mecánica y estadística, para deducir propiedades macroscópicas, se empieza con las leyes de Newton, pero en el proceso se tienen que introducir nuevos supuestos (por ejemplo que los átomos o moléculas están distribuidos uniformemente o que tienen la misma probabilidad de moverse en cualquier dirección) que a pesar de ser probabilísticas, se establecen como datos a priori. Por lo tanto, no queda claro si la introducción de esos nuevos elementos resulta consistente o justificada bajo la base de la aplicación de la mecánica Newtoniana. El debate sobre la existencia de los átomos y sobre la

¹⁸⁴ Véase Brush (1994, p. 286).

¹⁸⁵ Véase Guttman (1999, p.1).

justificación o no de combinar principios determinísticos y probabilísticos pone a estas nuevas formas de desarrollo de la física en una situación muy delicada y vulnerable.

Boltzmann mostró, al definir el equivalente mecánico del concepto de entropía, que un gas en un estado inicial arbitrario, llegaría a un estado de equilibrio de máxima entropía, como resultado de las colisiones de sus moléculas. Josef Loschmidt, un colega de Boltzmann, introdujo en 1876 un sencillo pero poderoso argumento que ponía en entredicho el edificio en el que se construía la mecánica estadística. Si tenemos un sistema que evoluciona hacia su máxima entropía, ¿que pasaría si en un momento dado detenemos el sistema, e invertimos las velocidades de todas las moléculas? En virtud del carácter simétrico en el tiempo de las leyes de la mecánica (si en las ecuaciones se cambia t por $-t$ se obtiene el proceso inverso, o sea que estas leyes no proporcionan un sentido del tiempo), el sistema volvería a su estado original, es decir, evolucionaría hacia una disminución de la entropía, siendo que la termodinámica nos dice que la entropía siempre aumenta. Los Ehrenfest bautizaron a esta contradicción como la paradoja de la reversibilidad. Boltzmann no sólo dio varios argumentos para defenderse de este ataque sino que se vio motivado por la paradoja para explorar otros conceptos.

Otra objeción a los trabajos de Boltzmann se basa en un teorema de Poincaré que establece que para ciertos sistemas dinámicos en los que se conserva la energía, necesariamente, si se le deja evolucionar por tiempo indefinido, regresará un número indeterminado de veces a estados tan cercanos como se quiera a las condiciones iniciales de las cuales había partido el sistema. Zermelo, alumno de Poincaré, hizo notar en 1896 que esto resultaba en clara contradicción con la segunda ley de la termodinámica. A esto se le llamó la paradoja de la recurrencia, de lo cual como veremos en las siguientes secciones, también se ocuparon los Ehrenfest.

El problema de los fundamentos de la mecánica estadística no está del todo resuelto en nuestros días. Nos dice Guttman que para ir al fondo del asunto en lo que concierne a la naturaleza de las probabilidades en la mecánica estadística, sobre todo en cuanto a si representan verdades objetivas o meramente opiniones subjetivas

se requiere de un temperamento filosófico.¹⁸⁶ Tal vez esta rama de la ciencia contribuya a que no se pierda esa vena más inquisitiva de la actividad científica que extraña Holton en nuestros días.

3.3 Boltzmann visto por Paul Ehrenfest

Con lo descrito en las dos secciones anteriores, resulta claro que uno de los personajes centrales, cuando de los orígenes de la mecánica estadística se quiere hablar, es Ludwig Boltzmann. Si bien actualmente se mantienen en pugna diferentes aproximaciones en torno a la búsqueda de los fundamentos de la mecánica estadística, todas ellas le deben algo al legado de Boltzmann. Y esto es así porque a lo largo de varias décadas, Boltzmann mantuvo una lucha permanente en la generación de nuevas ideas, conceptos y métodos que ayudaron a dar luz a los diferentes aspectos de la termodinámica y la teoría cinética.¹⁸⁷ En este sentido, podemos decir que Boltzmann fue un científico creativo cuyo trabajo principal consistió en interpretar la termodinámica desde puntos de vista mecánicos y eliminar las contradicciones entre los procesos mecánicos reversibles y los procesos termodinámicos irreversibles.

Al morir Boltzmann en 1906, después de varios años de haberse mermado su salud y de caer en una depresión que lo llevó al suicidio, su discípulo Paul Ehrenfest escribió un obituario en el que hace un recuento de los logros de su maestro resaltando su capacidad para lograr “una imagen maravillosamente unitaria”¹⁸⁸ basada en un esfuerzo continuado por alcanzar interpretaciones mecánicas coherentes, no sólo en sus trabajos de mecánica estadística sino también en otras áreas, como por ejemplo las concernientes a la teoría electromagnética. Tal parece

¹⁸⁶ Ibid., pp. 8, 9.

¹⁸⁷ Varios autores han analizado el trabajo de Boltzmann. Véase por ejemplo Brush (1994, pp. 231-248) o Klein (1973) u Ordóñez en su introducción a Boltzmann (1986).

¹⁸⁸ Las citas de Ehrenfest usadas en esta sección corresponden al obituario mencionado. El título de la publicación original es *Ludwig Boltzmann* y fue publicado en *Mathematisch Naturwissenschaftliche Blätter* en 1906 y se puede encontrar en Ehrenfest (1959, pp. 131-135), que es la colección de trabajos científicos de Ehrenfest editada por Martin Klein. En esta tesis, presentamos la traducción al español en el apéndice 3.2.

que Ehrenfest admiraba especialmente en Boltzmann, la capacidad para ir generando, como trabajo de toda una vida, una estructura teórica en torno a un problema central.¹⁸⁹

Ehrenfest nos pone a Boltzmann en escena en un momento en el que algunas aportaciones de Clausius y Maxwell ya habían andado parte del camino en lo que se refiere a la interpretación cinética del comportamiento de los gases y nos explica las opciones de trabajo de Boltzmann como nuevo investigador en esa área: “De acuerdo a las condiciones que presentaba la teoría en ese tiempo, un nuevo acercamiento sólo habría sido posible tomando parte en el perfeccionamiento de los experimentos o en el mejoramiento de los cálculos (...) de los cuales dependía la teoría cinética (...)”.¹⁹⁰ Esto hubiera significado hacer ciencia que podríamos clasificar como del tipo normal, siguiendo el lenguaje de Kuhn, pero Boltzmann buscó nuevos paradigmas y “se acercó de inmediato a la teoría cinética con una pregunta completamente nueva (...) ¿No debería ser la segunda ley también un principio puramente mecánico? (...)”¹⁹¹ que después lo llevaron a otras, como por ejemplo “¿cuáles son las suposiciones que deben venir junto con los axiomas mecánicos generales para poder probar la interpretación mecánica de la ley de la entropía?”,¹⁹² es decir Ehrenfest nos manifiesta que Boltzmann se propone buscar nuevos horizontes en la explicación de los fenómenos termodinámicos. Podemos agregar nosotros que para eso, efectivamente Boltzmann tiene que introducir el uso de nuevos elementos hipotéticos, aunados al atomismo y ligados a su concepción mecanicista de la naturaleza, como una forma de ir haciendo inteligibles los fenómenos, porque en definitiva, para Boltzmann, una teoría científica debe funcionar como una imagen de la realidad y en donde las hipótesis juegan un papel ya sea heurístico o metodológico para la construcción de dicha teoría. Para Boltzmann, en una palabra, ninguna aproximación a las ciencias naturales que evite el uso de hipótesis puede tener éxito.

¹⁸⁹ Véase Klein (1985, p. 79). Esta admiración que Ehrenfest sentía por Boltzmann y por otros grandes físicos de su tiempo, nos explica Klein, contrasta con el sentimiento de no poseer él mismo una clara línea de trabajo productivo.

¹⁹⁰ Véase el apéndice 3.2 de esta tesis, p. 218.

¹⁹¹ Ibid., pp. 218-219.

¹⁹² Ibid., p. 219.

Volviendo con Ehrenfest, nos explica en su obituario que la pregunta sobre si la segunda ley no debiera ser un principio puramente mecánico, Boltzmann la aborda muy joven (de 22 años) en su primer trabajo titulado *La interpretación mecánica de la segunda ley de la teoría del calor*, sin introducir nociones probabilísticas. Al convencerse de que este enfoque era insuficiente, tiene que hacer una reformulación hacia la segunda pregunta que hace referencia a las suposiciones que deben adherirse a los axiomas mecánicos, llegando a la conclusión de que las leyes de la termodinámica se basan “en las leyes de la mecánica y en las regularidades estadísticas que aparecen en medio de los movimientos aleatorios”.¹⁹³ Con los logros de Boltzmann en sus primeros años de investigación (1866-1871) se aclara la idea de que “la entropía es una ley probabilística” la cual “se profundizará de manera extraordinaria en los siguientes trabajos de Boltzmann”.¹⁹⁴

Ehrenfest hace referencia a 2 publicaciones muy renombradas y fundamentales en el pensamiento de Boltzmann, correspondientes a los años 1872 y 1877. El trabajo de 1872 es en el que aparece la ecuación de Boltzmann y el teorema H y que pretende resolver el problema de los procesos irreversibles. Este trabajo, nos dice Ehrenfest, “define una función H cuyos argumentos son datos cinéticos (...) es la interpretación cinética de la entropía (...) el valor H provee una medida de la desviación aún existente del equilibrio térmico”¹⁹⁵. Vale la pena agregar que aquí se encuentra un punto de interés histórico. Ehrenfest nos dice que

El cálculo del teorema H muestra muy claramente que: El resultado de que H cambie siempre sólo en una dirección, viene solamente por la condición, que uno establece como frecuencia de las diferentes colisiones, que surge del cálculo de probabilidad. El caso ocasional de un proceso opuesto para H (y por lo tanto de una reducción ocasional de la entropía) aparece correspondientemente sólo como inmensamente improbable, pero no imposible; y entonces el comportamiento de la entropía para los procesos irreversibles también está basado en la probabilidad.¹⁹⁶

¹⁹³ Ibid., p. 220.

¹⁹⁴ Ibid., p. 220.

¹⁹⁵ Ibid., p. 221. Véase también nota 179 de esta tesis.

¹⁹⁶ Ibid., p. 221.

Sin embargo, algunos autores sugieren que en esa publicación Boltzmann presenta el resultado de la disminución de H como consecuencia necesaria de las ecuaciones mecánicas del movimiento¹⁹⁷ y no sólo como sumamente probable como lo dice Ehrenfest. Boltzmann habría reconocido la existencia de excepciones sólo a partir de la crítica de Loschmidt varios años después. Para dilucidar la cuestión hay que establecer algunas diferencias.¹⁹⁸ Ciertamente Boltzmann se refiere en su artículo a que los problemas de la teoría mecánica del calor son realmente problemas del cálculo de probabilidades, pero aclara que sería un error creer que la teoría del calor tendría entonces que contener incertidumbres. La distinción que hay que hacer es entre una ley estricta o causal, que tiene una implicación del tipo “si..., entonces siempre...,” y una ley de probabilidad con una implicación del tipo “si..., entonces en un tanto por ciento de los casos...”.¹⁹⁹ En el caso del segundo tipo de ley, la relación con la experiencia sería menos segura, ya que el enunciado probabilístico sólo se reproduce en la observación cuando se cuenta con un número suficientemente grande de datos. Así, la conclusión sería que Boltzmann aceptaría excepciones entre la teoría y la observación pero no en la relación entre premisas y conclusión. Así, la ley del incremento de entropía estaría garantizada sólo en el sentido probabilístico, es decir, por la ley de los grandes números.

En el otro trabajo referido, el de 1877 y titulado *Sobre las relaciones entre la segunda ley fundamental de la teoría mecánica del calor y el cálculo de probabilidades*, nos dice Ehrenfest que se termina de responder “a la pregunta que había planteado Boltzmann al principio de su actividad: La ley de la entropía es un principio mecánico estadístico”.²⁰⁰ En realidad, en este último trabajo hay un giro explícito en los planteamientos de Boltzmann en el sentido de aplicar el concepto de probabilidad ya no sólo a manera de una función de distribución que asigna probabilidades a las velocidades moleculares, sino en el sentido de asignar probabilidades al estado de un gas como un todo. Un sistema termodinámico evolucionaría siempre hacia estados de mayor probabilidad, siendo el estado de

¹⁹⁷ Véase Klein (1973, p. 73).

¹⁹⁸ Nos basamos aquí en parte en las consideraciones de Uffink (2004).

¹⁹⁹ Véase también Reichenbach (1956/1988, pp. 82-84).

²⁰⁰ Véase el apéndice 3.2 de esta tesis, p. 222.

equilibrio, aquel que posee la máxima probabilidad. La entropía es, de hecho, una medida de la probabilidad del estado macroscópico particular que posea el gas.

Ehrenfest se refiere ya hacia el final de su obituario, y de manera mas concisa, a los trabajos de Boltzmann en otras áreas (teoría electromagnética principalmente), y nos recuerda su interés por usar siempre “imágenes mecánicas” que “son el material con el que preferentemente Boltzmann le da forma a sus creaciones”,²⁰¹ y sobre todo nos enfatiza el uso que Boltzmann hace de los ejemplos simples, para los cuales,

(...) encuentra un tratamiento exhaustivo y apasionado. Estos caminos hacen que los desarrollos de Boltzmann resulten, de manera poco común, muy vivos: La manera de desarrollar los ejemplos que, con sencillez extrema, siempre exhiben ya todas las formas características de los grandes problemas, nos da una visión de todo el laborioso trabajo que esta inmensa imaginación había realizado antes de penetrar en los resultados de mayor alcance.²⁰²

Seguramente Ehrenfest se refiere con emoción a esta característica de Boltzmann, dado su propio talento en el uso de modelos conceptuales simples para penetrar en las ideas fundamentales de una teoría, como tendremos oportunidad de comentarlo en la siguiente sección de este capítulo al analizar algunos de sus trabajos. Como lo dijera Einstein, al referirse a Ehrenfest: “su inusual y bien desarrollada capacidad para entender la esencia de una noción teórica, para despojar una teoría de su complicación matemática hasta que emerja sólo la idea básica con claridad”,²⁰³ nos habla de un hombre cuyo valor principal no lo encontramos en su capacidad de cálculo o de innovación creativa, sino en su capacidad crítica para clarificar las ideas que surgen en las polémicas que son parte del desarrollo de la ciencia. Y mucho de esto seguramente lo aprendió de su maestro Boltzmann.

Con ese mismo talante crítico, nos deja Ehrenfest al final de su obituario con una serie de interrogantes que llevan la intención de hacernos reflexionar sobre la

²⁰¹ Ibid., p. 225.

²⁰² Ibid., p. 226.

²⁰³ Véase el apartado *Paul Ehrenfest in Memoriam* en Einstein (1950, p. 216).

manera en que se desarrollan los conceptos, las hipótesis, las estructuras teóricas de la física: “¿Cambiarán aquellos resultados de Boltzmann de su versión mecánica hacia alguna otra versión completamente diferente? ¿Causarán los avances en la termodinámica de la radiación, que en alguna presentación futura del intercambio de calor y del equilibrio térmico, se agote la preferencia del influjo de las colisiones moleculares y cambie hacia la radiación?”.²⁰⁴ Ehrenfest cierra su escrito ofreciéndonos la idea de un cambio continuo, de una “transición de formas”, como lo característico de los logros científicos más importantes y su relación con el “gusto artístico de sus creadores”.²⁰⁵

3.4 Los Ehrenfest y la mecánica estadística

Paul Ehrenfest conoció a su futura esposa Tatiana durante una estancia de estudios en Gotinga en el otoño de 1902.²⁰⁶ Ella era una estudiante de matemáticas nacida en Rusia. Para ambos sus disciplinas científicas constituían algo más que una profesión; eran el centro de su vida intelectual y trabajaban en ellas con verdadera pasión. Por eso, el apoyo mutuo que se brindaron fue muy importante para sus carreras científicas. En relación con el impacto que Tatiana tuvo sobre su esposo, el biógrafo de Paul Ehrenfest nos explica que

Paul Ehrenfest no era el tipo de pensador que desarrolla sus ideas lentamente en la soledad de su estudio. El tenía que hablar sobre ellas, trabajarlas a través de la discusión y la argumentación con algún colega crítico y competente, y Tatiana se mostró deseosa y dispuesta de jugar ese papel. La mente de ella, rápida y extraordinariamente lógica, contrastaba con la suya de carácter más inventiva, pero la urgencia vital de probar una idea hasta lo más profundo la compartían ambos. Incluso cuando no conociera los problemas físicos para los cuales se había inventado una teoría, Tatiana Ehrenfest podía en ocasiones llegar justo al

²⁰⁴ Véase el apéndice 3.2 de esta tesis, p. 226.

²⁰⁵ Ibid., p. 227.

²⁰⁶ Sobre este período en la vida de Paul Ehrenfest y el impacto de Tatiana en el trabajo científico de su esposo, véase el capítulo 5 de Klein (1985).

meollo del asunto y plantear alguna pregunta de estructura lógica que lograba poner a su esposo en la senda correcta.²⁰⁷

Sin embargo hay que decir que en lo que se refiere a los temas de mecánica estadística, el papel de Tatiana en realidad iba más allá de una mera interlocutora para su esposo, pues ella realizó investigación y tuvo importantes publicaciones (algunas de ellas en coautoría con Paul) sobre los fundamentos de la mecánica estadística, destacando su interés por los conceptos de entropía y el papel y el significado de conceptos como “aleatoriedad”, “posibilidad”, etcétera, aplicados a procesos físicos. En un artículo titulado *On the Use of the Notion “Probability” in Physics*,²⁰⁸ Tatiana introduce primero los términos de “orden” y “nivel”. Si de una urna con dos bolas rojas y una negra, sacamos al azar sólo una de ellas tendremos un “evento de primer orden” – la actitud normal aquí sería la de esperar que el resultado sea “bola roja” si aplicamos las “leyes de la probabilidad”. Si de la urna sacamos n bolas (tomemos por ejemplo $n = 3$), pero una a la vez, viendo su color y regresándola a la urna, tendremos un “evento de segundo orden e índice n ” – si $n = 3$ la actitud normal sería la de esperar que el resultado sea de dos bolas rojas y una negra, pues es la combinación más probable.²⁰⁹ Tatiana nos destaca que en un proceso físico en el que se tienen que introducir suposiciones de carácter probabilístico, la actitud del físico consiste en aceptar la “hipótesis” del evento más probable de un orden dado. Pero como se observa en el ejemplo citado, la aceptación de la hipótesis de un orden dado m , implica la renuncia a la hipótesis de orden $m - 1$ (para esperar en el evento de segundo orden que salgan dos bolas rojas y una negra, renunciamos a la idea de que en un evento de primer orden el resultado sea “bola roja”). Por eso, nos dice Tatiana “hay un número infinito de hipótesis del más probable y todas ellas están en *contradicción entre sí*” por lo que concluye que no tiene sentido hablar de “leyes de probabilidad”, sino que hay que hablar de “cálculo de probabilidades”.²¹⁰

²⁰⁷ Ibid., p. 51.

²⁰⁸ Véase Ehrenfest, T. (1958). Aunque el artículo referido es de 1958, el tema lo había tratado Tatiana desde 1911, lo había publicado en Rusia y había sido tema de discusión con su esposo Paul, quien lo usó como tópico de varias conferencias según ella misma lo explica en el *abstract* de este artículo.

²⁰⁹ Ibid., p. 389.

²¹⁰ Ibid., p. 390.

En un curso sobre mecánica estadística que ofrecía Paul Ehrenfest en Leiden en el año escolar 1915-1916,²¹¹ les aconsejaba a sus alumnos: “Si es necesario, siempre traten de ilustrar usando modelos de dados o de urnas para evitar cualquier misticismo”. Con esto evitarían que las suposiciones probabilísticas quedaran ocultas dentro de las ecuaciones que se derivaban a partir de los cálculos que involucraban los movimientos y colisiones de las partículas. Para Ehrenfest, el uso de modelos simples, como “caricatura” del problema real, permitía resaltar y exponer de una manera clara los aspectos más cruciales de los fenómenos estudiados, pues de esa manera, con pocos cálculos se podrían entrever las conexiones lógicas entre las suposiciones y los resultados que de otra forma quedarían escondidos en las ecuaciones. Una de sus lecciones tenía que ver con las objeciones (las de Loschmidt y Zermelo mencionadas anteriormente) que se habían levantado en contra de la interpretación que Boltzmann había dado de la segunda ley de la termodinámica. Como era su costumbre, el tema lo abordó por medio de un modelo simple de urnas que él y Tatiana habían ideado hacía algunos años y sobre el cual habían publicado dos artículos en 1906 y 1907 titulados *Über eine Aufgabe aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung, die mit der kinetischen Deutung der Entropievermehrung zusammenhängt* (Sobre una tarea del cálculo de probabilidades, en conexión con la interpretación cinética del incremento de entropía)²¹² y *Über zwei bekannte Einwände gegen das Boltzmannsche H-Theorem* (Sobre dos conocidas objeciones contra el teorema H de Boltzmann).²¹³

El modelo de urnas de Paul y Tatiana, que se hizo muy popular, surgió de los análisis que el joven matrimonio había discutido en torno a las citadas objeciones en un intento por clarificar las contradicciones que ahí se presentaban. De esta manera, Paul utilizaba en su propia persona aquellas virtudes que él había destacado sobre su

²¹¹ La descripción que aquí se ofrece se puede consultar con mayor detalle en Klein (1989, pp. 32-35).

²¹² Presentado en la *Mathematisch Naturwissenschaftliche Blätter*, volumen 3. Se puede consultar en su forma original en Ehrenfest (1959, pp. 128-130) o traducido al español al final de esta tesis en el apéndice 3.1.

²¹³ Presentado en el *Physikalische Zeitschrift*, volumen 8. Se puede consultar en su forma original en Ehrenfest (1959, pp. 146-149) o traducido al español al final de esta tesis en el apéndice 3.3.

maestro en el obituario que analizamos previamente, es decir, el arte de inventar y usar modelos conceptuales simples para clarificar un concepto.

El modelo ha sido discutido en detalle por otros autores,²¹⁴ pero nosotros presentamos aquí nuestra traducción al español de la primera sección del artículo de 1906 para poder extraer algunas de las ideas que nos interesan en este espacio. Se plantea en ese artículo lo siguiente:

Se nos dan N bolas (por ejemplo 100). Las mismas son numeradas en forma consecutiva del 1 al N para poder distinguir las individualmente. Se reparten inmediatamente en dos urnas, de tal manera que la urna A contenga P_0 (por ejemplo 90) y la urna B tenga $Q_0 = N - P_0$ (correspondientemente 10) bolas. Pero no se sabe qué bolas quedaron en A y cuáles en B. En una bolsa se encuentran N cartas de lotería numeradas del 1 al N . Cada 10 segundos se saca una carta, se anuncia su número, se regresa a la bolsa y se mezcla bien. Luego se escoge otra, se anuncia, etc. Cada vez que se anuncia un número, la bola que lleva ese número salta de la urna en la que se encuentra hacia la otra urna y permanece ahí hasta que más tarde vuelva a salir su número. Es claro que: siempre es más probable que la bola escogida se encontrará en la urna más llena y no en la más vacía. Por lo tanto, en tanto que la urna A siga estando mucho más llena que la urna B, la mayoría de los siguientes resultados del sorteo vaciarán la urna A en la urna B y sólo rara vez sacarán una bola de la urna B.²¹⁵

Los Ehrenfest introducen una cantidad y definida como la diferencia absoluta entre el número de bolas que se encuentran en las urnas y analizan su comportamiento. Esta cantidad, vendría siendo equivalente a la función H de Boltzmann. Aunque la “curva” que representa a y tiende hacia un valor nulo, nada impide que, si se espera un tiempo suficientemente grande, pueda crecer, incluso hasta un valor N , correspondiente al vaciado de una de las urnas. Con este modelo,

²¹⁴ Véase por ejemplo Klein (1985, 116-119) y Kac (1959).

²¹⁵ Véase el apéndice 3.1 de esta tesis, p. 213. El modelo ilustraría de una manera bastante directa el caso, por ejemplo, de un gas confinado en un receptáculo con un volumen dado dividido en dos por una barrera con una abertura. Si partimos de una condición inicial en la que la densidad de las dos mitades es diferente, las moléculas podrían pasar a través de la abertura de un lado a otro tendiendo a igualar la densidad. El modelo llegó a ser llamado también “modelo de los perros y las pulgas”, al sustituir las urnas por dos perros y las bolas por pulgas que saltan de un perro al otro.

desarrollado luego con más detalle en el artículo de 1907, los Ehrenfest tratan de dar respuesta a las objeciones presentadas por Loschmidt y Zermelo en el sentido de que el aumento de la entropía no es una ley absoluta, sino que es de carácter estadístico.²¹⁶ Este último artículo se desarrolla en un estilo muy característico de Paul Ehrenfest que consiste en presentar secuencialmente los puntos que quiere mostrar, comparar o deducir lógicamente. En este caso: 1. El teorema H en su formulación usual, 2. La objeción de reversibilidad de Loschmidt, 3. La objeción de recurrencia de Zermelo, 4. El punto de vista de Boltzmann en relación con estas dos objeciones, 5. Las contradicciones, 6. Su modelo que clarificará el asunto y 7. Comentarios finales en donde concluye que “ni la objeción de reversibilidad, ni tampoco la objeción de recurrencia son de ningún modo apropiadas o suficientes para desaprobar la afirmación de Boltzmann de que el cociente diferencial temporal de H es, con enorme probabilidad, negativo para valores grandes de H ”.²¹⁷ Un punto especialmente interesante que los Ehrenfest hacen notar es que en su modelo resulta claro que dado un valor grande de y (o de H), la “curva”, como regla general, tiende a decrecer, y sólo de vez en cuando progresa hacia arriba, pero lo más importante, “este enunciado aplica tanto si uno recorre la curva de izquierda a derecha o de derecha a izquierda”.²¹⁸ Es decir, hay una simetría en el tiempo con lo cual se responde a la objeción de reversibilidad (dada por las ecuaciones de la mecánica), pero a la vez se constata la afirmación de Boltzmann de la tendencia de H a disminuir.

Regresando al artículo de Tatiana mencionado anteriormente (*On the Use of the Notion ...*) con referencia a su concepto de “hipótesis del evento más probable de un orden dado”, menciona ella que, al aplicar la teoría de la probabilidad a la explicación de ciertas regularidades de fenómenos físicos, normalmente se asume la hipótesis de segundo orden, y presenta el caso del teorema H de Boltzmann como un ejemplo de esto, ya que, nos dice, “los cálculos de presión y temperatura de un gas se basan en suposiciones de segundo orden” y explica que

²¹⁶ En este artículo es en el que los Ehrenfest bautizan a estas objeciones con los nombres de reversibilidad (Umkehrwand) y recurrencia (Wiederkehrwand).

²¹⁷ Véase el apéndice 3.3 de esta tesis, p. 236.

²¹⁸ Ibid., p. 235.

un ejemplo característico en el que se pasa de una hipótesis de segundo orden a una hipótesis de tercer orden, urgido por las circunstancias de la investigación (en este caso por la objeción de Zermelo basada en los postulados de la mecánica), la encontramos en la admisión de Boltzmann de que las colisiones entre las moléculas, siendo eventos aleatorios, no se pueden comportar exactamente de acuerdo con su hipótesis de las colisiones y que por lo tanto habrá veces en que la entropía de un sistema aislado cambiará en un sentido contrario a sus cálculos.²¹⁹

Esto quiere decir que entonces normalmente apostamos por el hecho de que un sistema debe asumir el estado más probable de acuerdo con una cierta elección de orden. Pero, ¿es cierto que siempre debemos esperar la realización del evento más probable? Esta pregunta nos lleva a otra paradoja cuando consideramos como sistema al universo entero y que Tatiana nos plantea, ya para finalizar su artículo, de una manera muy sugerente: Según Tatiana, tendríamos que creer que

el mundo tiende al estado más probable, y se asume que esta tendencia ha durado por mucho tiempo antes de la aparición de vida orgánica en la Tierra y que durará por mucho tiempo después de este momento. ¡Pero esto implica que todo este tiempo, el estado del mundo se ha encontrado lejos de su estado más probable! Entonces parece que tenemos que aceptar al mismo tiempo los cambios más probables del estado del mundo y un estado poco probable del mismo mundo al mismo tiempo (...) tenemos dos lados de la situación, uno de los cuales satisface la idea de lo más probable, mientras que el otro lo contradice, pero uno normalmente ignora el último e insiste en creer en las “leyes de la probabilidad”.²²⁰

La intención de esta sección fue mostrar la actitud de los Ehrenfest ante sus disciplinas científicas, la cual fue en todo momento crítica, atenta a las dificultades y a las paradojas que se presentaban, otorgándole un gran valor a la continua discusión de los puntos cruciales como constituyente principal de la vida y la actividad científica. Esta actitud les valió el respeto de la comunidad científica. En particular,

²¹⁹ Ehrenfest, T. (1958, p. 391).

²²⁰ Ibid., p. 392.

un notable matemático de su tiempo, Félix Klein, los invitó a escribir una colaboración para la *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften*, en donde hicieran una revisión de los principios de la mecánica estadística, la cuál se convirtió en una referencia obligada para físicos y matemáticos.

3.5 El artículo de los Ehrenfest en la *Encyklopädie*

En octubre de 1906, Ehrenfest había terminado el obituario de Boltzmann al que nos referimos en la sección 3.3 y también había escrito junto con su esposa el artículo titulado *Sobre una tarea del cálculo de probabilidades, en conexión con la interpretación cinética del incremento de entropía* mencionado en la sección 3.4, que es uno de los escritos en los que desarrollaron el famoso modelo de las urnas. Ehrenfest escogió también el tema de ese artículo para presentarlo en un Seminario de Matemáticas al que lo había invitado el connotado matemático Félix Klein, quien tenía a su cargo la edición de la *Encyklopädie*^{221, 222}. Impresionado por la capacidad analítica y didáctica de Ehrenfest y por el éxito que había tenido la conferencia, Klein decidió invitarlo a escribir un artículo, junto con su esposa si así lo deseaba, sobre los principios de la mecánica estadística para la *Encyklopädie*. El artículo se le había encargado previamente a Boltzmann, pero ante su muerte, Félix Klein se había visto en la necesidad de encontrar un nuevo autor, y vio en Ehrenfest a la persona ideal, quien cumplía con dos importantes características: Ehrenfest comprendía a la perfección todas las ideas de quien fuera su maestro y director de tesis y además poseía un talento especial para presentar de manera brillante los conceptos clave, como lo había demostrado en su conferencia previa. Ehrenfest aceptó, junto con Tatiana, el reto que se les presentaba. Según les explicó Klein, en el artículo tendrían que mostrar las cuestiones fundamentales de la mecánica estadística, clarificar las

²²¹ El proyecto de la *Encyklopädie* había sido concebido varios años antes y sus líderes eran Félix Klein, Franz Meyer y Heinrich Weber. Su objetivo era presentar los logros, los métodos y las aplicaciones principales de las ciencias matemáticas del siglo XIX para ofrecer así una imagen del lugar que tenían las matemáticas en la cultura de esa época. Los artículos propiamente dichos eran escritos, previa invitación, por reconocidos matemáticos y científicos de diversos países.

²²² Este breve recuento histórico sobre la *Encyklopädie* y la participación de los Ehrenfest en la misma, se basa en Klein (1985, pp. 81-83).

interrogantes que el tema presentaba y mostrar su desarrollo. Les tomó tres años tener lista una primera versión y casi dos años más terminarla y publicarla,²²³ tiempo que además coincidió con su estancia en San Petersburgo, ciudad donde Tatiana había pasado también su infancia.

El artículo de Paul y Tatiana²²⁴ considera, como los autores mismos lo expresan en el prefacio, que todos los estudios en torno a la conexión de la mecánica con la teoría de la probabilidad se han alimentado de las controversias en torno al teorema H de Boltzmann. Los Ehrenfest se dan a la tarea de recoger los elementos conceptuales escondidos en esas controversias y presentar las ideas de una manera más coherente sobre todo en lo que se refiere a aclarar las ideas de Boltzmann, pero dándole mucha importancia a identificar los puntos débiles o que ellos consideran que carecen todavía de la fundamentación debida. Por eso en la estructura del artículo, una primera parte está dedicada a las primeras contribuciones a la mecánica estadística antes de dichas controversias y una segunda parte la dedica a las formulaciones estadísticas que corresponden al tratamiento más moderno del tema.²²⁵ También hay una tercera parte en la que se discuten las contribuciones de Josiah Willard Gibbs, a las cuales, aunque les reconoce el valor de tratar de dar una presentación más sistemática de la mecánica estadística, al mismo tiempo les critica el cubrir sólo una fracción de las ideas principales.

El artículo de la *Encyklopädie* se convirtió en una referencia fundamental sobre el tema de la mecánica estadística, por lo que ha sido analizado, elogiado y

²²³ Apareció originalmente bajo el título *Begriffliche Grundlagen der Statistischen Auffassung in der Mechanik* (Fundamentos Conceptuales del Enfoque Estadístico en la Mecánica) en la *Encyklopädie der Mathematischen Wissenschaften*, Vol. IV, Parte 2, (Leipzig: Teubner, 1911). Se puede consultar también en su versión alemana en Ehrenfest (1959, pp. 213-300). Aquí estaremos haciendo referencia a la traducción al inglés hecha por M.J. Moravcsik: Ehrenfest, P. & T. (1959).

²²⁴ Aunque el trabajo está firmado por los dos, la misma Tatiana le da un mayor crédito a su esposo en el prefacio de la versión traducida diciendo: “La labor de reunir la literatura y de organizar el artículo de la *Encyklopädie* fue realizada por Paul Ehrenfest. Mi contribución consistió sólo en discutir con él todos los problemas involucrados, y creo que logré clarificar conceptos, que eran, con frecuencia, usados incorrectamente” Ehrenfest, P. & T. (1959, p. viii).

²²⁵ La distinción la hacen refiriéndose por un lado a la “vieja formulación” de las investigaciones en torno a la mecánica estadística, asociada principalmente con la prueba original de Boltzmann de su teorema H (1872), y por otro lado a la “formulación moderna”, asociada principalmente con el cambio de concepción hacia una interpretación probabilística del citado teorema.

criticado por varios autores.²²⁶ En esta sección nos limitaremos a los puntos centrales que tienen que ver con el cambio de concepción que, según sugieren los Ehrenfest, se da a raíz de las diversas objeciones (principalmente las de Loschmidt y Zermelo) que se levantaron en torno a los primeros trabajos de Boltzmann. Esos primeros escritos llevaron a Boltzmann a generalizar el concepto de entropía y a aplicarlo a estados fuera de equilibrio de un sistema, demostrando que una función H que él define, siempre disminuiría y llevaría a un cambio de la función de distribución de probabilidad de velocidades de las moléculas hasta que se alcanzara la distribución de Maxwell-Boltzmann, que sería la condición de equilibrio.²²⁷ Una vez en ese estado, la función H , y por ende la entropía, se mantendrían constantes. Estos resultados dependían de una suposición respecto al número de colisiones por unidad de tiempo entre moléculas de determinada velocidad. Ehrenfest explica este proceso que llevaba a la estabilidad, por medio de un modelo simplificado, bidimensional y fácil de entender que consistía en suponer sólo cuatro posibles velocidades de las moléculas: hacía arriba, hacia abajo, hacia la derecha y hacia la izquierda. En este modelo, las moléculas podían cambiar de dirección por medio de colisiones con otros elementos fijos; una molécula viajando hacia la derecha, por ejemplo, podría ser redirigida hacia arriba o hacia abajo al chocar con uno de estos elementos. Ehrenfest demuestra que, con el transcurrir del tiempo, la cuarta parte de las moléculas viajaría en cada una de las direcciones permitidas, sin importar cuál era la distribución inicial de las velocidades.²²⁸ Sin embargo, el resultado de un cambio siempre decreciente de la función H (o un cambio siempre creciente de la entropía) era contradicho por las objeciones de Loschmidt y Zermelo. Por eso, explica Ehrenfest, las nuevas explicaciones de Boltzmann consistirían en aplicar un enfoque probabilístico. Parte

²²⁶ Ver por ejemplo: Klein (1985, pp. 119-140), quien hace un análisis muy completo del artículo; Guttmann (1999, pp. 70-73), que es una referencia muy actual sobre los fundamentos probabilísticos de la mecánica estadística y que considera el artículo de los Ehrenfest como una de las contribuciones de mayor influencia en la literatura sobre el tema; Sklar (1993, pp. 67-71), quien hace un resumen de la crítica de Ehrenfest a Gibbs; Brush (1994, pp. 363-377) lo considera sobre todo una contribución importante al desarrollo de la teoría ergódica en mecánica estadística. Esta última referencia critica al artículo de la *Encyklopädie* por dejar mucho que desear como presentación histórica del trabajo de Maxwell y Boltzmann, pero reconoce que muchos de los aparentes errores históricos que presenta el artículo no son tales si uno toma cuidadosa cuenta de las extensas notas a pie de página.

²²⁷ Véase nota 179 en esta tesis.

²²⁸ Véase el apéndice a la sección 5 del artículo, Ehrenfest, P. & T. (1959, pp. 10-13).

de la confusión se daría por la inconsistencia de Boltzmann al darle diferentes significados a la probabilidad, a veces como promedios temporales (fracción relativa de tiempo que se permanece en algún estado), a veces como promedios de las partículas, a veces como promedios de conjuntos o *ensembles*. Para evitar estas ambigüedades se puede proceder a aplicar lo que los Ehrenfest llamaron la hipótesis ergódica, usada en diferentes momentos por Boltzmann, para lo cual es necesario referirse a los espacios de fase.

El estado instantáneo de un gas, su microestado, está definido por N parámetros, que corresponden a la información de posición y movimiento de sus moléculas (si se considera, por ejemplo, un sistema con M moléculas y se asignan p parámetros de posición y q parámetros de movimiento para cada molécula, entonces $N = [p+q]M$). Dicho microestado se puede representar geoméricamente como un punto en un espacio N -dimensional (el espacio de fase). A ese punto le llamamos punto de fase, el cual, al evolucionar el sistema (las moléculas van cambiando de posición y de velocidad) se desplazará definiendo una trayectoria en el espacio de fase de N dimensiones. Si es un sistema cerrado, el sistema estará restringido a mantener siempre una misma energía total E y por lo tanto el punto de fase se podrá mover sólo sobre la “superficie” (de $N - 1$ dimensiones) de energía constante. La hipótesis ergódica, usada por Boltzmann y clarificada por Ehrenfest considera que un sistema cerrado recorre, en su proceso de evolución, todos los estados compatibles con su energía (el punto de fase pasa por todos los puntos de la “superficie” de energía) y dicha hipótesis es usada como base para afirmar la equiprobabilidad de los estados. Boltzmann, y también Maxwell se sintieron justificados a asumir la hipótesis ergódica, según nos explica Ehrenfest, apoyándose en “la complejidad de las colisiones de las moléculas entre sí y de las moléculas con las paredes rugosas, pero perfectamente elásticas del contenedor”²²⁹. Sin embargo para Ehrenfest dicha hipótesis es dudosa²³⁰ y prefiere introducir una condición menos restrictiva a la cual llama hipótesis quasi-ergódica que considera que el punto de fase no pasa por todos

²²⁹ Véase nota 97, Ibid., p. 90.

²³⁰ De hecho, poco después, en 1913, Plancherel y Rosenthal demostraron la imposibilidad de la hipótesis ergódica al mostrar que una trayectoria unidimensional no puede llenar un espacio de mayor dimensionalidad. Véase Guttman (1999, p. 73).

los puntos de la “superficie” de energía, pero sí que la cubre densamente (“approach arbitrarily closely each point of the energy surface”).^{231, 232}

Para explicar la manera en que Boltzmann reinterpreta el teorema H, con lo cual se puede dar respuesta a las objeciones que habían surgido, Ehrenfest tiene que introducir otros conceptos. Además del espacio de fase del sistema mencionado anteriormente, y al que Ehrenfest le llama espacio Γ , introduce también el espacio de fase molecular μ . Este último se define, no para todo el sistema, sino para cada molécula por separado, y es un espacio con tantas dimensiones como parámetros de posición y de movimiento se definan. Un punto de ese espacio representa el estado instantáneo de una molécula. Por lo tanto el estado instantáneo de un gas compuesto por M moléculas quedará definido por M puntos en el espacio μ . Ehrenfest sugiere dividir el espacio μ en pequeños paralelepípedos ω , cuyos lados representarían pequeños intervalos de cada uno de los parámetros de posición y movimiento mencionados. Cada una de esas pequeñas celdas ω_i contendría, en un instante dado de tiempo, un cierto número a_i de puntos del total M . Ehrenfest le llama “distribución \mathbf{Z} ” al conjunto de números a_i . A una distribución dada \mathbf{Z} le corresponde una región continua de la superficie de energía constante en Γ (hay un número infinito de puntos en Γ que corresponden a la misma distribución \mathbf{Z}). La función H , desde este punto de vista, sería $H = \sum a_i \log a_i$.

La nueva descripción estadística estudiaría el comportamiento promedio de un número infinito de copias idénticas del sistema, cada una con un estado instantáneo inicial distinto, pero correspondientes a la misma distribución \mathbf{Z} . Esta “ficción”, como la llama Ehrenfest, permite reemplazar ciertas “suposiciones probabilísticas” por enunciados estadísticos. Así, no tendríamos una curva H , sino todo un conjunto de ellas. Estas curvas tomadas individualmente tendrían un comportamiento que no contradice el carácter simétrico en el tiempo de los sistemas mecánicos que Loschmidt y Zermelo habían considerado. Estas curvas H cumplen

²³¹ Véase nota 98, Ehrenfest, P. & T. (1959, p. 90).

²³² Para una consideración más actual del status de la hipótesis ergódica, ver por ejemplo Lombardi (2003).

con las siguientes características: 1. Casi siempre decrecen cuando parten de un punto H_1 que se encuentra arriba del mínimo H_0 , 2. Lo anterior es cierto ya sea que uno se mueva de izquierda a derecha (secuencia positiva del tiempo) o de derecha a izquierda (secuencia invertida del tiempo) y 3. Normalmente la curva H se mantiene cerca del mínimo H_0 .²³³ Esta curva, en la que sí puede crecer H , aunque no sea lo más probable, es a la que Boltzmann hace referencia al responder a sus críticos, pero no es la misma que él había derivado previamente. Boltzmann nunca estableció esto claramente, siendo causa de mucha confusión. Ehrenfest trata de enmendar la situación explicando que la curva H derivada previamente por Boltzmann, y a la cual Ehrenfest le llama “la curva del Teorema H” para evitar la confusión, equivaldría en realidad a la “curva de concentración” del conjunto de curvas H del conjunto o *ensemble* ficticio de sistemas idénticos, un promedio de todas ellas que, ahora sí, efectivamente, decrece monótonicamente hacia el valor mínimo H_0 y cuando lo alcanza, ya no se mueve de ahí.²³⁴ De esta manera, Ehrenfest muestra que, contrario a lo que muchos creían, no hay contradicción en las afirmaciones de Boltzmann, pero advierte que dichas afirmaciones aún no han sido demostradas. Por último, Ehrenfest también nos hace notar “cuántos enunciados puramente intuitivos se esconden detrás de la terminología probabilística normalmente usada (por Boltzmann)”²³⁵.

Sin duda Felix Klein hizo una buena elección al pedir a los Ehrenfest la redacción de este artículo. La intención del mismo, al formar parte de la *Encyklopädie*, encajaba de manera perfecta con los intereses teóricos y de profundidad conceptual que más interesaban a los Ehrenfest. Sin embargo, en las conclusiones del artículo, dejan ver la importancia de las últimas aplicaciones (el estudio del movimiento de los electrones en los metales, las investigaciones sobre soluciones coloidales) y cómo ellas eran las responsables del renovado interés por las ideas de Boltzmann y por su fe en el uso de imágenes mecánicas y atomísticas, pues dichas aplicaciones “han tenido el efecto de revivir y profundizar el concepto de que todos los cuerpos se pueden visualizar como agregados de un número finito de

²³³ Ehrenfest, P. & T. (1959, p. 33).

²³⁴ Ibid., pp. 34, 35.

²³⁵ Véase nota 140, *ibid.*, p. 94.

componentes elementales idénticos y muy pequeños”.²³⁶ Sin embargo, reconocen que la situación es más complicada en las aplicaciones a los fenómenos de radiación, en donde

el teorema de equipartición de energía extendido al equilibrio térmico entre la materia y el éter estaba bien confirmado en lo que se refiere a la parte infrarroja de la radiación del cuerpo negro (...) sin embargo, su extensión al dominio ultravioleta, lleva a resultados absurdos, de tal manera que (...) hasta el momento nadie sabe cómo se pueden resolver estas dificultades²³⁷.

El mismo año de 1911, Ehrenfest bautizaría esos resultados absurdos como la “catástrofe ultravioleta” y significarían el camino hacia la física cuántica

3.6 Conclusiones

La búsqueda racional del conocimiento encontró en las matemáticas la herramienta ideal para la representación de la realidad física. Pero en el proceso de construcción de las teorías esto tuvo significados diferentes para los científicos. Para un fenomenista, por ejemplo, el físico tendría que construir sus teorías traduciendo al lenguaje matemático sólo lo que directamente percibimos con nuestros sentidos o con nuestros instrumentos de medición. Pero para físicos como Boltzmann, a quien con mayor certeza podemos señalar como el fundador de la mecánica estadística, la construcción de una teoría es mucho más que eso, pues para hacer ciencia, el científico tiene que ir más allá de la experiencia, apostar a nuevas formas de imaginar la realidad, para luego contrastarlas con la experiencia y la justificación lógica. La interpretación de la realidad como un conglomerado de partículas invisibles interactuando entre sí requirió, además, el uso de recursos probabilísticos que despertaron nuevas sospechas, pues ¿cómo deben entenderse esas probabilidades?, ¿cómo deben utilizarse para que aporten explicaciones sobre los fenómenos observados?, y sobre todo ¿qué papel pueden jugar las probabilidades dentro de un

²³⁶ Ibid., p. 68.

²³⁷ Ibid., p. 69.

esquema mecanicista que opera bajo los supuestos de un determinismo estricto? Estas y otras preguntas de carácter epistemológico tuvieron que ser abordadas en la construcción de la mecánica estadística.

Los Ehrenfest percibieron la importancia que el desarrollo de la mecánica estadística tenía dentro de su disciplina más amplia de la física teórica, se ocuparon de las paradojas que surgían, clarificaron conceptos y dejaron una huella importante que pensadores posteriores recogerían. Siendo su carácter crítico lo que los distinguía, más que dar respuestas, identificaron algunas de las preguntas clave que tendrían que ser abordadas para poder avanzar con fundamento, preguntas sobre la relación de las probabilidades con la descripción física, sobre la fundamentación de la hipótesis ergódica, sobre la posibilidad de describir procesos irreversibles asumiendo la existencia de fenómenos físicos reversibles en principio, etc.

4 La radiación del cuerpo negro y la discretización de la energía: Paul Ehrenfest y el drama cuántico

Hacia el último cuarto del siglo XIX, la visión mecánica del mundo físico ya no era del todo incuestionable. Varios físicos, entre ellos Maxwell, habían venido construyendo una teoría electromagnética que se perfilaba como posible alternativa al mecanicismo. Un aspecto central en esta disputa era la relación entre materia y radiación, y con ella, el problema del éter que se discutió en el capítulo 2. Por otro lado, se tenía también la muy exitosa línea de investigación sobre los fenómenos del calor, la termodinámica, en donde encontramos el trabajo de científicos, como Boltzmann, que buscaron una explicación mecánica de dichos fenómenos, de donde surgió la mecánica estadística. En el capítulo 3 nos referimos entre otras cosas a la problemática filosófica y epistemológica que estas investigaciones despertaron, especialmente en lo relativo a los fenómenos irreversibles. El drama cuántico al que nos referimos en el título de este capítulo surge de la convergencia de diferentes ideas en torno a las disciplinas mencionadas, particularmente en la búsqueda que hizo Planck de una explicación de la entropía basándose en la electrodinámica de Maxwell, y de la insatisfacción que sentía Einstein en su ideal de visión unificada de la física, al tener que considerar por un lado la existencia de partículas materiales discretas y de un campo continuo por el otro. Al final, la introducción del cuanto de energía le permitirá a la física ir saliendo de diferentes callejones sin salida, en los que aparentemente se encontraba, gracias al trabajo teórico y experimental, pero también a la imaginación y a la creatividad de una pléyade de científicos.

El científico, en su quehacer profesional diario y en su toma de decisiones, no puede aislarse de influencias psicológicas y sociales para guiarse solamente por los datos empíricos y la maquinaria lógica.²³⁸ El uso de metáforas, analogías y otros recursos imaginativos, sujetos por su misma naturaleza a una variedad de interpretaciones, aunque puede poner en peligro la objetividad de la ciencia, resulta

²³⁸ Véase el capítulo 12 de Holton (1998c) titulado *Metaphors in science and education*.

necesario para el avance de la misma, pues a fin de cuentas nuestra provisión de metáforas y otras herramientas de la imaginación determinan, en buena medida, lo que se puede pensar en cualquier campo. En este capítulo enfatizaremos el hecho de que el estudio de la radiación del cuerpo negro y la eventual introducción del cuanto se guió por una serie de analogías, idealizaciones, experimentos mentales y adopción de métodos de análisis provenientes de otros fenómenos diferentes al de la radiación, y cómo con el uso de estas herramientas se llegó a la semilla que representaría una transformación radical de la física.

La crítica y aportación de Paul Ehrenfest en este tema resultan especialmente útiles para cumplir con los propósitos mencionados en el párrafo anterior. En las conclusiones de su artículo en la *Encyklopädie*, como se mencionó al final de la sección 3.5, nos dice Ehrenfest que la aplicación de las ideas de Boltzmann en los fenómenos de la radiación representaba serias dificultades que no habían sido resueltas. Veremos cómo el mismo Ehrenfest se había ocupado de estos problemas desde 1905²³⁹ y cómo en su crítica y análisis del tema se preocupa por la validez de las analogías y la adopción de metodologías y por el carácter de las hipótesis, supuestos y condiciones utilizadas, dándole a sus reflexiones un carácter de interés epistemológico. Por eso es que la crítica y la aportación de Paul Ehrenfest al drama cuántico será nuestro recurso para adentrarnos en esta historia y poder rescatar lo que hay de continuidad y lo que hay de rompimiento con la física clásica en los estudios sobre la radiación del cuerpo negro y en la introducción de la discontinuidad cuántica que se llevó a cabo en los últimos años del siglo XIX y primeros del siglo XX. Si bien sabemos que Kuhn nos habla del carácter no acumulativo de la ciencia durante las revoluciones científicas,²⁴⁰ nosotros defenderemos que incluso en los casos de cambios conceptuales profundos, como ocurre con la revolución cuántica, la continuidad de ideas sigue estando presente.

²³⁹ En ese año de 1905 aparece su primera publicación formal sobre el tema, pero lo había venido trabajando desde unos años antes.

²⁴⁰ Véase Kuhn (1962).

4.1 La aparición del cuanto

Aunque tradicionalmente se ha acordado que el concepto del cuanto de energía nació en un trabajo de Planck a finales de 1900 y publicado a principios de 1901, nosotros asumiremos la posición de Kuhn²⁴¹ en el sentido de que Planck no tuvo en mente, sino hasta muchos años después, una verdadera discontinuidad física de la energía, y que fueron Albert Einstein y Paul Ehrenfest, como vamos a ver, quienes sí introdujeron un cambio conceptual importante en el período 1905-1906; Planck, en el período referido fue un físico trabajando plenamente dentro de los paradigmas clásicos.

La historia, sin embargo, y sobre todo si defendemos la idea de que a pesar de los cambios conceptuales revolucionarios sigue habiendo una continuidad de ideas, empieza mucho antes, con la espectroscopia y la introducción del concepto de cuerpo negro, y continúa, ya con mayor acercamiento a los nuevos conceptos, en el año 1895, respecto al cual podemos señalar 3 datos importantes: es el año en el que Planck comienza sus trabajos sobre la radiación del cuerpo negro, es la frontera temporal en la que todavía no se pueden anticipar las nuevas áreas de la física que sacudirán sus cimientos (la radiactividad, los rayos X, la relatividad, el cuanto, etc.) y finalmente es también el año en el que el rápido desarrollo de la tecnología hará posible la realización de nuevos experimentos que pondrán a prueba nuevos campos de la física a los que antes sólo se podía acceder a través de la especulación.²⁴²

²⁴¹ Véase Kuhn (1987). Algunos autores han hecho notar una aparente divergencia entre los conceptos desarrollados en *La estructura de las revoluciones científicas* y su aplicación en este caso de estudio que realiza Kuhn, en donde sus tesis aparecen más escondidas. Nosotros nos mantendremos al margen de dicho debate, pero para mayor información se puede consultar Sharrock & Read (2002) y Roy (2002).

²⁴² Véase Stehle (1994, p. 54).

4.1.1 La espectroscopia y el concepto de radiación de cuerpo negro

Paul Ehrenfest, en su análisis de los trabajos de Planck, toma como punto de partida “la afirmación de Kirchhoff sobre la universalidad de la radiación del cuerpo negro”. Nos referiremos brevemente en esta sección a algunos antecedentes que nos permitan contextualizar mejor los trabajos sobre la radiación del cuerpo negro iniciados por Planck.

La teoría electromagnética desarrollada en el siglo XIX resultó espectacularmente exitosa en la descripción de la propagación de la luz y otras formas de radiación. Sin embargo, dicha teoría no podía explicar las formas en que la materia, según diferentes experimentos, emitía o absorbía radiación, constituyendo esta situación, una verdadera encrucijada de las ciencias físicas. El estudio de la luz (y después otras formas de radiación) en términos de su contenido espectral (colores) tiene una historia que se remonta hasta Newton y sus experimentos con prismas. Sin embargo, nos ubicaremos a principios del siglo XIX, cuando la luz empezó a ser descrita en términos ondulatorios, es decir, como vibración que se propaga a través del éter.²⁴³

La espectroscopia se desarrollaría en el siglo XIX y revelaría información muy extraña sobre las características de la radiación emitida o absorbida por la materia y mostraría la incapacidad de las herramientas teóricas conocidas para explicar los mecanismos de interacción entre esas dos entidades físicas que los paradigmas de la ciencia de ese siglo estudiaban: materia y radiación. En 1814 Joseph Fraunhofer había estudiado una peculiaridad en el espectro continuo de la luz solar, que consistía en presentar una serie de rayas oscuras. Posteriormente se fueron encontrando formas de producir artificialmente líneas oscuras en los espectros haciendo pasar la luz a través de diversas sustancias (a los espectros resultantes se les llamó posteriormente espectros de absorción). Los diversos esfuerzos por explicar

²⁴³ Idea que surge de la aplicación de la analogía y la metáfora, pues como expresaba el propio Thomas Young, “it [la idea de que la luz es la propagación de un impulso en el éter] is strongly confirmed by the analogy between the colours of a thin plate and the sounds of a series of organ pipes”. La cita está tomada y explicada con mayor amplitud en Holton (1998c, pp. 232-234).

este tipo de fenómenos vinieron dando fruto ya en la segunda mitad del siglo gracias a los trabajos de científicos como Gustav Kirchhoff y Robert Wilhelm Bunsen. Así como se identificaban espectros de absorción, también se identificaban espectros de emisión detectados en llamas que contenían diversas sustancias (el sodio, por ejemplo daba lugar a líneas brillantes que coincidían en su posición con algunas de las líneas oscuras de Fraunhofer). El trabajo de colaboración entre los personajes mencionados, un físico y un químico, arrojó conclusiones importantes: 1) se podía utilizar el espectro como forma de identificación de los elementos químicos, 2) una sustancia capaz de emitir una cierta línea espectral posee una gran capacidad de absorber la misma línea (así, por ejemplo, se concluía que las líneas oscuras del espectro solar eran un indicativo de que en la atmósfera solar existía sodio), 3) Lo anterior abría toda una nueva área de trabajo, la astrofísica. Este tipo de resultados científicos en torno a la emisión y absorción de radiación por la materia fue muy exitosa, pero obviamente no explicaban los mecanismos por los cuales se producían esos fenómenos. De acuerdo con las teorías existentes, la emisión de luz de una frecuencia dada requeriría de la existencia de una carga eléctrica oscilatoria (osciladores eléctricos) pero no existía un modelo que explicara satisfactoriamente su existencia y forma de operación.

Por otro lado, el concepto de cuerpo negro surge de una serie de consideraciones teóricas trabajadas por el mismo Kirchhoff, las cuales solamente esbozaremos aquí con objeto de precisar alguna terminología.²⁴⁴ Para cada cuerpo que pueda emitir y absorber energía, deducía Kirchhoff, sus capacidades de emisión (E) y de absorción (A) pueden ser diferentes, pero la relación entre emisión y absorción es la misma para todos los cuerpos ($E/A = K$), siendo entonces ésta una función universal que depende solamente de la temperatura T y la frecuencia ν , es decir, $K = K(T, \nu)$.²⁴⁵ Kirchhoff imaginó la existencia de un cuerpo cuya capacidad de absorción A fuera igual a 1, al cual llamó cuerpo negro (aquel que absorbe toda

²⁴⁴ La mayoría de las fuentes secundarias que hablan de la génesis de la física cuántica empiezan hablando de Planck, pero en Sánchez Ron (2001, pp. 25-30) sí podemos encontrar una discusión más o menos amplia de estas consideraciones teóricas de Kirchhoff.

²⁴⁵ Esta característica de universalidad fue la que le llamó tanto la atención a Planck en su búsqueda de *absolutos* que es lo que significaba para él la meta de una imagen unificada del mundo.

radiación que incida sobre él). Dicho cuerpo tendría una capacidad de emisión E igual a la función universal $K(T, \nu)$.²⁴⁶

Los esfuerzos por alcanzar el ajuste entre teoría y experimento, alimentándose mutuamente, son el motor para los cambios conceptuales y para los avances técnicos. Para 1895 los resultados experimentales respecto a la radiación del cuerpo negro (la función universal K) dejaban aún mucho que desear, pero sí se había determinado que dicha función de radiación tenía un máximo a una frecuencia ν_m o longitud de onda λ_m para cada temperatura.²⁴⁷ Sin embargo, muy cerca de Berlín, el *Physikalische-Technische Reichsanstalt* (Instituto Imperial Físico Técnico), creado especialmente para ocuparse de los aspectos más aplicados de la física, se embarcó en el estudio de cuestiones relacionadas con la radiación del cuerpo negro y pudo ofrecer a los teóricos resultados experimentales muy confiables.²⁴⁸ Para 1896 se tenían un par de resultados teóricos, con fundamentos clásicos desde luego, corroborados experimentalmente, que restringían, pero aún no determinaban con precisión, la verdadera distribución de la radiación del cuerpo negro. El primero de estos resultados es la ley de radiación de Stefan-Boltzmann que establece que la energía total radiante, integrada sobre todas las frecuencias es directamente proporcional a T^4 . Esta relación fue encontrada empíricamente por Stefan y

²⁴⁶ La radiación de cuerpo negro tomó después diversos nombres. Planck la llamó “radiación natural”. También se le llamó “radiación de cavidad”, debido a que si se tiene radiación electromagnética en una cavidad y se le permite alcanzar un estado de equilibrio con las paredes de la misma, el espectro de dicha radiación correspondería a la de cuerpo negro, siendo ésta la forma en que se trataba de recrear experimentalmente ese resultado. Stehle (1994, p. 115) nos explica con detalle cuáles habrían sido las indicaciones de Kirchhoff para construir un cuerpo negro ideal: “Se debe de construir una cavidad en un buen conductor de calor, y hacer un pequeño agujero en la pared. Las paredes de la cavidad se deben de mantener a la temperatura deseada. El interior de la cavidad debe de tener una forma tal que toda radiación que entre por el agujero sea necesariamente reflejada muchas veces, con posibilidad de ser absorbida, antes de que alcance el agujero de nuevo y escape de la cavidad. Dicha fuente, si está bien diseñada y construida y con un buen control de temperatura puede actuar como fuente de radiación de cuerpo negro. Debe de ser necesariamente grande y masiva. Debe usarse en un ambiente mucho más frío que la cavidad misma de manera que toda radiación presente provenga con seguridad del cuerpo negro y no de los alrededores”.

²⁴⁷ $\lambda_m = c / \nu_m$, donde c es la velocidad de la luz.

²⁴⁸ Algunos nombres importantes de físicos experimentales que tuvieron un papel importante en esta historia son Paschen, Lummer, Pringsheim y Rubens, entre otros.

demostrada teóricamente por Boltzmann.²⁴⁹ El segundo resultado, es la ley de desplazamiento de Wien, que dice que la función de distribución espectral debe de tener la forma $K(T, \nu) = \nu^3 f(\nu/T)$, y de la que se deduce que, sin importar el valor de la temperatura T , el producto $\lambda_m T$ es siempre el mismo, es decir, si por ejemplo se duplica la temperatura, entonces la longitud de onda para la cual ocurre el máximo en el espectro de radiación, se reduce a la mitad. Además de estos resultados, se pueden mencionar otros dos que ofrecen una forma explícita para la distribución espectral en función de la frecuencia: una deducida por el mismo Wien, pero con razonamientos no demasiados rigurosos que se ajusta bien a los resultados experimentales para frecuencias altas, pero que falla en frecuencias bajas, y la otra conocida como la distribución de Rayleigh-Jeans que es la que se deduce directamente de principios clásicos y que da buenos resultados para frecuencias bajas, pero no así para frecuencias altas, donde crece indefinidamente y significaría la presencia de una energía infinita.

Varios ejemplos en la historia de la ciencia nos muestran esa necesidad de aferrarse a ciertas creencias que le permiten al investigador darle sentido a su visión del mundo, pero que tarde o temprano tienen que abandonar para ajustarse a la prueba empírica. Desde los griegos hasta Copérnico, el círculo fue una guía de inteligibilidad de los movimientos de los astros, hasta que Kepler, al contar con observaciones más precisas del movimiento de Marte, tuvo que abandonarla, pero no sin antes persistir por mucho tiempo en la idea del círculo y tratar de salvarla a través de explicaciones sobre cómo los fenómenos pueden diferir de la realidad. De manera similar, los esquemas clásicos, especialmente la visión mecánica y continua del mundo, eran una prueba de inteligibilidad del mundo físico en el siglo XIX, creencia que tuvo que derrumbarse ante la existencia de datos experimentales más precisos (al principio de la radiación del cuerpo negro y después de otros fenómenos) y la necesidad de ajustar los esquemas teóricos para “salvar las apariencias”. Y decimos ajustar, precisamente porque a diferencia de lo que nos sugeriría un falsacionismo

²⁴⁹ El trabajo teórico de Boltzmann tuvo la visión de suponer que la radiación electromagnética en una cavidad se comporta como un gas perfecto en equilibrio (Purinton, 1997, p. 152). La continuación de esta analogía por Planck sería crucial en la génesis de la discontinuidad cuántica.

ingenuo, una teoría no se derrumba por la existencia de datos experimentales que la refutan, sino que primero surgen una serie de hipótesis auxiliares en busca de esos ajustes y sólo al final pueden llevar a un cambio de paradigma total.

4.1.2 El cuanto de Planck y la crítica de Ehrenfest

Las convicciones filosóficas de los científicos, juegan en general un papel heurístico importante y determinan en alguna medida lo que para cada uno de ellos es el objetivo de su disciplina y los métodos propios de la misma, lo cual desde luego puede ser especialmente un punto de significativa controversia.²⁵⁰ Esto resulta especialmente importante en los personajes involucrados en la génesis de la física cuántica, pues en ese proceso fueron surgiendo preguntas fundamentales en torno a los paradigmas clásicos de continuidad, de causalidad, etc. El camino que recorrieron los científicos de esta época dependió de qué tan fuertemente comprometidos estuvieran con las formas tradicionales de trabajo en su disciplina, de su visión del conocimiento, de su idea de lo que es una teoría científica y de su concepto de la realidad. En esta sección nos referiremos a la contribución de Max Planck y al análisis que de la misma hace Paul Ehrenfest. La profunda reflexión de Ehrenfest sobre los caminos que estaba siguiendo la física durante la primera década del siglo XX le permitieron más tarde contribuir también de manera significativa a ese proceso de transición.

4.1.2.1 La contribución de Planck

Ya sea que se le conceda o no a Planck el haber introducido el concepto del cuanto de energía, es indiscutible que su trabajo es fundamental en la historia de los orígenes de las ideas cuánticas y resulta muy revelador conocer sus convicciones filosóficas. Planck era ante todo un realista, como lo muestra el siguiente extracto de su autobiografía científica:

²⁵⁰ Véase De Regt (1996).

Lo que me condujo a mi ciencia, lo que desde joven me hizo entusiasmar por ella, fue el hecho –en absoluto evidente- de que las leyes de nuestro pensamiento concuerdan con las regularidades que presenta el flujo de las impresiones que recibimos del mundo exterior, el hecho de que al ser humano le resulta posible, por tanto, obtener por medio del puro pensamiento información acerca de tales regularidades. Que el mundo exterior constituya algo independiente de nosotros, algo absoluto frente a lo que nos encontramos, tiene de cara a ello una importancia fundamental; y la búsqueda de las leyes que rigen ese Absoluto me parecía la más bella tarea de una vida dedicada a la ciencia.²⁵¹

Para Planck, existe un mundo exterior real, pero que sólo podemos conocer indirectamente para así formarnos *una imagen* del mismo. El proceso es a partir de hipótesis, las cuales “como parte constituyente de la imagen física del mundo, son un producto de la plena libertad especulativa de la mente humana”.²⁵² Precisamente por eso, el problema de la radiación de cuerpo negro atrajo la atención de Planck, pues Kirchhoff había dejado muy claro que se trata de una función universal, un absoluto, en palabras de Planck. De acuerdo con Kirchhoff, el estado de la radiación del calor al que se llega en una cavidad rodeada por sustancias emisoras y absorbentes de temperatura uniforme es completamente independiente de la naturaleza y disposición de las sustancias y es función únicamente de la temperatura y la frecuencia, pero de ninguna manera de las propiedades de las sustancias. Veamos en palabras del propio Planck, tomadas de su conferencia Nobel,²⁵³ la meta que se propuso y los medios conceptuales de que dispuso para lograrla:

(...) encontrar la solución del problema de la distribución de energía en el espectro normal de radiación del calor (...) Para lograr esto no había otra forma más que buscar, de entre todas las sustancias existentes en la naturaleza, una con capacidad de emisión y de absorción conocida, y calcular las propiedades de la radiación del calor en su estado estacionario de intercambio de energía con dicha sustancia.

²⁵¹ Véase Planck (2000, p. 21). La letra itálica es nuestra.

²⁵² Ibid., p. 30. Esta cita lo caracteriza también como antipositivista.

²⁵³ Véase Planck (1920). Se trata de la conferencia que dictó al recibir el premio Nobel "por su contribución al estudio de la física por medio de su teoría cuántica".

De acuerdo con Kirchhoff, esas propiedades serían independientes de la naturaleza del cuerpo (o sustancia). Para este propósito Planck escogió los osciladores lineales de Hertz (a los cuales les llamó resonadores). En el segundo de los dos primeros artículos en los cuales Ehrenfest analiza el trabajo de Planck,²⁵⁴ se dice que un punto de partida de Planck es extrapolar “la ley de Kirchhoff sobre la universalidad de la radiación del cuerpo negro (...) a sistemas ficticios”. Siguiendo la idea de Planck que él rememoraba en esa conferencia Nobel tendríamos que:

Si se ponen varios de esos osciladores Hertzianos dentro de una cavidad rodeada de una esfera de paredes reflectoras, entonces por analogía con osciladores y resonadores de audio, la energía se intercambiará entre ellos por medio de la emisión y absorción de ondas electromagnéticas, y al final se producirá dentro de la cavidad la radiación estacionaria correspondiente a la ley de Kirchhoff, la así llamada radiación de cuerpo negro.

Más que la analogía mencionada por Planck en ese párrafo, veremos cómo el paralelo con el comportamiento de un gas en un compartimiento es el referente básico de los desarrollos teóricos sobre la radiación del cuerpo negro y cómo el análisis crítico sobre la validez y los límites de ese paralelismo y también sobre el carácter de las hipótesis y los supuestos en la explicación de ambos fenómenos son la base de la visión crítica de Ehrenfest. Los principales artículos de Planck a los cuales Ehrenfest hace referencia en su escrito de 1905 son: *Über irreversible Strahlungsvorgänge* (al cuál identifica como A), *Entropie und Temperatur strahlender Wärme* (B), *Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum* (C) y *Über irreversible Strahlungsvorgänge* (D). En su artículo de 1906 Ehrenfest analiza un libro publicado por Planck en ese mismo año titulado *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung*. Veamos sucintamente cuáles fueron las

²⁵⁴ Los dos artículos de Ehrenfest publicados en 1905 y 1906 a los cuales se hará referencia en esta sección se titulan *Über die physikalischen Voraussetzungen der Planckschen Theorie der irreversiblen Strahlungsvorgänge* (Sobre las suposiciones físicas de la teoría de Planck de los procesos de radiación irreversibles) presentado en la *Wiener Berichte*, número 114 y *Zur Planckschen Strahlungstheorie* (Sobre la teoría de la radiación de Planck) presentado en el *Physikalische Zeitschrift*, volumen 7. Ambos se encuentran en Ehrenfest (1959, pp. 88-101 y 120-124). En esta tesis, presentamos la traducción de dichos artículos en los apéndices 4.1 y 4.2.

aportaciones de Planck²⁵⁵ en estos trabajos para posteriormente pasar a una descripción de la crítica de Ehrenfest.

Los trabajos referidos de Planck tienen como tema central la radiación del cuerpo negro, sin embargo, debemos enmarcarlos dentro de un contexto más general que era la búsqueda de Planck por dar una explicación del concepto de irreversibilidad y su relación con el incremento de la entropía. En un principio, la segunda ley de la termodinámica poseía para Planck un carácter absoluto, por lo que no suscribía los métodos estadísticos de Boltzmann, sino que se guiaba por lo que consideraba un tratamiento más inductivo del tema. Sin embargo, como veremos más adelante, llegó un momento en el que, después de mucha resistencia, tuvo que adoptar las mencionadas técnicas estadísticas. Curiosamente, este paso, que para Planck era en cierto sentido un fracaso de sus primeros esfuerzos, a la postre se convirtieron en el elemento que le dio a Planck un lugar entre los grandes de la física de todos los tiempos²⁵⁶.

El artículo referido como (A) en la nomenclatura de Ehrenfest y enviado para su publicación en noviembre de 1899, era en realidad una repetición para los *Annalen der Physik* del quinto artículo de una serie de 5 que había venido escribiendo desde febrero de 1897. En los primeros artículos Planck tenía expectativas “ingenuas, encantadoras y simpáticas” de que “las leyes de la electrodinámica clásica, si se aplicaban de manera suficientemente general, evitando hipótesis especiales, serían suficientes para explicar la parte más significativa del proceso y lograr así el objetivo deseado”.²⁵⁷ Ya para la cuarta entrega tuvo que asumir una primera hipótesis estadística que consistía en la introducción del concepto de “radiación natural”.²⁵⁸ En la quinta entrega, y también en el artículo (A), siguiendo las ideas anteriores, Planck

²⁵⁵ La bibliografía sobre el tema es, evidentemente, muy amplia. Aquí daremos una exposición muy breve sólo para generar el contexto donde se ubica el análisis y crítica de Ehrenfest. Para mayor profundidad de pueden ver, por ejemplo, Sánchez Ron (2001), Stehle (1994), Kragh (2000), Mehra & Rechenberg (1982, vol. I), Purrington (1997), Jungnickel & McCormmach (1990), Brush (1994), Kuhn (1987), etc.

²⁵⁶ Véase Kuhn (1987, p. 31).

²⁵⁷ Véase Planck (1920).

²⁵⁸ Se introduce la “radiación natural” como una restricción en la teoría y con el supuesto de que es el único tipo de radiación que se puede encontrar en la naturaleza. Se asume un criterio de aleatoriedad, de ausencia de correlación entre las diferentes armónicas de la radiación.

definió una expresión para la entropía S (le llamaremos Σ_1 para ajustarnos a la nomenclatura de Ehrenfest) de un oscilador de frecuencia ν y energía E que era función de la relación E/ν (que era otra forma de expresar la ley de desplazamiento), y de ahí, con argumentos electromagnéticos y termodinámicos, muestra que Σ_1 crece monótonicamente (demostrando la irreversibilidad) y que en estado de equilibrio (cuando Σ_1 ya permanece constante), se alcanza la distribución de radiación espectral de Wien. Hasta este momento se pensaba que esta distribución concordaba bien con los resultados experimentales. Quizás eso apresuró a Planck a proponer, convencido por su demostración, que dicha ley de Wien tenía el mismo status y límites de validez que la propia segunda ley de la termodinámica. Para su infortunio, poco después de su artículo, nuevos resultados experimentales mostraban que la ley de Wien no era correcta para el rango de frecuencias bajas. Por eso, en otro artículo (el que hemos llamado B) revisó algunos de sus argumentos concluyendo que la ley de distribución de Wien no era estrictamente necesaria para satisfacer la segunda ley. Pero entonces ¿cuál era la fórmula correcta para la distribución espectral?

Planck se abocó a encontrar una fórmula que coincidiese con los resultados experimentales y lo logró de dos maneras. La primera de ella con un razonamiento heurístico, ad hoc, en la que un término de su teoría (el inverso de la segunda derivada de la entropía con respecto a la energía) que tenía una dependencia lineal con la energía ($-aE$) y que conducía a la ley de Wien lo cambió a una dependencia cuadrática ($-aE-bE^2$), sin aludir a fundamento físico alguno, que lo condujo a una nueva fórmula, la ahora conocida como la ley de Planck.²⁵⁹ Motivado por la confirmación de que su fórmula satisfacía los resultados experimentales, Planck se dedicó los días subsecuentes a “elucidar el verdadero carácter físico de la fórmula”. Esta búsqueda fue la que lo llevó a incorporar las ideas de Boltzmann que conectaban

²⁵⁹ Curiosamente, si sólo hubiera usado el término cuadrático, esa expresión lo hubiera llevado a la ley de Rayleigh, que a diferencia de la de Wien, se comporta bien para frecuencias bajas y falla en las altas, es decir, el procedimiento de Planck es una simple interpolación entre las fórmulas de Rayleigh y de Wien. El mismo Planck alude a esta parte de su análisis en los siguientes términos: “una fórmula de interpolación afortunadamente seleccionada” (Planck, 1920).

la entropía con la probabilidad y que incorporó en el artículo que aquí hemos identificado como (C).²⁶⁰

En ese artículo se proponía corregir su teoría previa que lo había llevado a la demostración de la ley de Wien y decía: “será necesario encontrar primero, en el conjunto de condiciones que nos llevan a la ley de Wien (...) el término que pueda ser cambiado; luego será cuestión de eliminar ese término y hacer una sustitución apropiada para él”.²⁶¹ Su estrategia consiste ahora en encontrar una expresión para la entropía del sistema de resonadores replicando un razonamiento estadístico que Boltzmann había utilizado para la entropía de un gas de N moléculas. Boltzmann asociaba la entropía con la probabilidad del estado del gas, y la probabilidad a su vez dependía del número de configuraciones del gas que correspondían a ese estado. Para poder “contar” las posibles configuraciones, tenía que introducir una discretización. Las moléculas de Boltzmann sólo podían tomar un valor de energía múltiplo de ϵ . Boltzmann contaba las diferentes maneras o *complexiones*²⁶² en que se podía distribuir una energía total E en N moléculas para dar lugar a una determinada distribución.²⁶³ Planck hizo algo similar con sus resonadores: consideró que su sistema tenía N resonadores y que entre ellos se distribuía una energía total $E = \epsilon P$. Planck usó una forma combinatoria para calcular el número de *complexiones* R correspondiente a una cierta distribución en función de N y P . Luego aplicó como fórmula para la entropía del sistema de resonadores la expresión $S_N = k \log R$ ²⁶⁴ y,

²⁶⁰ Fue el mismo Boltzmann quien le hizo ver la necesidad de usar argumentos probabilísticos al mostrarle que las ecuaciones de Maxwell (igual que las leyes mecánicas) eran simétricas en el tiempo y no se podía derivar, sólo de ellas, un proceso unidireccional en el tiempo (irreversible). Boltzmann había sufrido, como vimos en el capítulo anterior, el mismo proceso con la crítica de Loschmidt sobre su intento de fundamentar mecánicamente las leyes de la termodinámica.

²⁶¹ Véase Planck (1901, p 553).

²⁶² Por ejemplo: la molécula 1 tiene 3ϵ de energía, la molécula 2 tiene 5ϵ de energía, etc.

²⁶³ Por ejemplo N_1 moléculas tienen ϵ energía, N_2 moléculas tienen 2ϵ energía, N_3 moléculas tienen 3ϵ energía, etc.

²⁶⁴ En esta fórmula, el número de *complexiones* R que corresponden a un estado del gas, representa una medida de la probabilidad W y de hecho para Planck la expresión $S_N = k \log W$ “sirve como una definición de la probabilidad W , ya que en los supuestos básicos de la teoría electromagnética no hay evidencia definitiva de tal probabilidad”. Por otro lado, el que la probabilidad W sea proporcional al número de *complexiones* R lo que dice es que todas las *complexiones* son igualmente probables, lo cual, admite Planck, no tiene ninguna justificación física y “si esto ocurre o no, en todo caso deberá ser probado por la experiencia”. Navarro & Pérez (2002, p. 386) hacen estas y otras observaciones para destacar que Planck estaba plenamente consciente de la arbitrariedad de su noción de probabilidad.

después de sustituir y dividir entre N para tener la entropía de un resonador, obtiene una expresión para S (que aquí le llamaremos Σ_2 para usar la nomenclatura de Ehrenfest) que es diferente a la que usó antes (Σ_1). Esta nueva expresión quedaba en función de E/ε y comparando con la expresión equivalente a la ley de desplazamiento que dice que la entropía debe ser función de E/v , Planck se da cuenta de que para que sean compatibles se requiere que ε sea proporcional a v , es decir $\varepsilon = hv$, o sea la ahora famosa fórmula de cuantización de la energía, con la constante de proporcionalidad h ahora llamada constante de Planck. Con su nueva expresión para la entropía, deriva la ley de distribución (de Planck) a la que había llegado antes por otros métodos.

El método aplicado por Planck lo tomó prestado de Boltzmann, pero Boltzmann en el análisis de un gas, al final de su procedimiento aplica el límite $\varepsilon \rightarrow 0$, puesto que el recurso a la discretización se debía a la necesidad de hacer un conteo de posibles configuraciones, pero al final se tenía que restaurar el carácter continuo del sistema. Planck no toma el límite porque en ese caso, su distribución se convierte en la distribución de Rayleigh (que no tiene sentido o no es físicamente aceptable para frecuencias altas por crecer indefinidamente). ¿Hasta que punto estaba Planck consciente de estar introduciendo una concepción física radicalmente diferente a los paradigmas clásicos? Todo parece indicar que en ese momento la cuantización era un mero artificio de cálculo y no tenía un sentido físico real. La mayoría de los físicos contemporáneos no entendieron los razonamientos de Planck y lo verdaderamente importante para muchos de ellos era que había llegado a una expresión que concordaba a la perfección con los resultados experimentales, excepto para algunos físicos más críticos, entre ellos Einstein y Ehrenfest que sí se vieron intrigados por el significado oculto en los trabajos de Planck.²⁶⁵

²⁶⁵ Según Kuhn (1987, p 201) Einstein y Ehrenfest vieron que el procedimiento de Planck requería realmente una discontinuidad de energía, en tanto que Planck mismo sólo llegó a verlo así varios años después. Incluso en sus *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung* (Lecciones sobre la teoría de la radiación del calor) publicadas en la primavera de 1906 no hace ninguna mención explícita de una discontinuidad aunque sí se refiere a la constante h como el elemento o unidad de acción (Klein, 1985, p. 238).

Posteriormente a estos hechos, en octubre de 1901, Planck publicó un artículo más (D) tratando de complementar sus investigaciones en torno a estos temas. En esta contribución vuelve a usar la segunda expresión (Σ_2) para la entropía, y aunque reconoce no haber podido establecer en forma única la expresión de la entropía, se muestra confiado de que un tratamiento futuro más general podría fijar de manera única la entropía.

4.1.2.1 El análisis de Ehrenfest

El primer contacto de Paul Ehrenfest con el tema de la radiación del cuerpo negro ocurrió antes de graduarse, en una visita que hizo junto con su amigo Ritz a Leiden en 1903 para escuchar unas conferencias de Lorentz.²⁶⁶ El tema lo cautivó, pero tuvo que esperar a graduarse en 1904 para volver a prestarle suficiente atención. Su esfuerzo por dilucidar el trabajo de Planck dio lugar a las publicaciones de 1905 y 1906 que ya hemos mencionado.

El primero de esos trabajos lo dedicó a la búsqueda de los supuestos físicos que subyacían en la teoría de la radiación del cuerpo negro de Planck y es donde cita los artículos de Planck que hemos mencionado y a los que él identifica como A, B, C y D. La pregunta que guía el análisis del artículo y que Ehrenfest introduce al principio es “¿Cuáles son las hipótesis – independientes entre sí – que le permiten a esta teoría generar, sin ambigüedad, una distribución de energía de la radiación del cuerpo negro para cada temperatura?”²⁶⁷ Para eso, primero se propone mostrar que a partir de la teoría de Planck, realmente no se puede llegar a probar que “con una energía total dada, Σ permanece constante temporalmente sólo cuando el estado de radiación estacionario, posea, sin ambigüedad, una cierta distribución espectral (correspondiente a la energía total)”.²⁶⁸ A diferencia de la teoría de Boltzmann para

²⁶⁶ Lorentz había sido el primero en presentar por escrito su punto de vista sobre el trabajo de Planck, en donde calificaba a las «unidades de energía» finitas como parte esencial de la teoría. Véase Klein (1985, p.232). Como ya sabemos, Ehrenfest sería sucesor de Lorentz muchos años después, en 1912.

²⁶⁷ Véase el apéndice 4.1 de esta tesis, p. 237.

²⁶⁸ Ibid., p. 239.

los gases, en donde se definía una función $(-H)$ única que representa la entropía y que solamente puede crecer hasta llegar a un estado estacionario correspondiente a la distribución de velocidades de Maxwell-Boltzmann, en la teoría de Planck se habían usado dos funciones distintas para representar la entropía (Ehrenfest se refiere aquí a los artículos A y D, donde se usaban las funciones Σ_1 y Σ_2) y que producían estados estacionarios diferentes. Con esto, dice Ehrenfest, se muestra “una diferencia esencial entre la función de Planck Σ en su comportamiento en el modelo Planckiano y la entropía termodinámica en su comportamiento en sistemas térmicos aislados”.²⁶⁹ A través de un análisis dimensional, partiendo de la linealidad de las ecuaciones electromagnéticas y de los resonadores, Ehrenfest demuestra que en la teoría de Planck, la condición estacionaria no conduce a una distribución espectral única sin contradecir la ley de desplazamiento de Wien. A partir de aquí Ehrenfest se plantea entonces que “para que la teoría Planckiana ofrezca un resultado sin ambigüedad, será necesario que agreguemos un requisito independiente (...)”.²⁷⁰

Ehrenfest encuentra en el ahora famoso artículo C las hipótesis adicionales que se plantean y que en la primera parte de su análisis había dejado fuera de consideración debido a que el papel que jugaban en las ideas de Planck no parecía claro. Las nuevas hipótesis eran:

1. La hipótesis sobre la igualdad probabilística en la distribución de energía sobre los resonadores.
2. La hipótesis de que la energía de la radiación de los diferentes colores está compuesta de pequeñas partículas de energía de valor $E_v = v \times 6.55 \times 10^{-27}$ erg-sec.²⁷¹

²⁶⁹ Ibid., p. 240.

²⁷⁰ Ibid., p. 246.

²⁷¹ Véase el apéndice 4.1 de esta tesis, p. 249. Klein (1985, p. 234) comenta que en esta frase Ehrenfest está interpretando erróneamente el pensamiento de Planck, ya que la discretización de Planck en todo caso se refería a la energía de sus osciladores y de ninguna manera a la radiación libre. En el mismo sentido Kuhn (1987, p. 172) opina que Ehrenfest, al igual que Einstein contribuyó en diferentes momentos (quizás éste es uno de ellos) a “preparar el camino para una nueva actitud hacia el significado de la obra de Planck”. En otras palabras, Planck pudo haber sido responsable de que surgiera una creencia entre sus colegas que él mismo no compartía.

Ehrenfest comenta con respecto a la primera hipótesis, que claramente tiene su análogo en la teoría de Boltzmann, pero respecto a la segunda hipótesis menciona que “hasta donde yo puedo ver, no existe para ella una analogía en la teoría de Boltzmann”.²⁷² Y en este punto promete abordar de nuevo el asunto en otro artículo.

En 1906, Ehrenfest recibió una copia de las *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung* (Lecciones sobre la teoría de la radiación del calor) de Planck, a las cuales hace referencia en su segundo artículo sobre el tema, presentado ese mismo año. Ehrenfest empieza repitiendo el argumento desarrollado en su artículo anterior en el sentido de que la teoría de Planck en principio no ofrecía una definición única de la entropía en la cavidad, y que para hacerlo tenía que imponer una hipótesis adicional, con la cual se desviaba claramente de los principios aceptados de la mecánica estadística. Para explicar las limitaciones de la teoría de Planck, presenta una “analogía con la teoría cinética de los gases”,²⁷³ muy a su estilo, para mostrar y clarificar una situación de un gas que sí sería equivalente al modelo de Planck.²⁷⁴ El aumento de entropía se debe a los choques de las moléculas entre sí, y a los choques entre las moléculas y las paredes del espacio físico que encierra el gas. Supongamos un gas idealizado donde las moléculas no chocan entre sí, sino solamente con las paredes. Entonces las velocidades de las moléculas sólo cambiarán en dirección, conservándose entonces la distribución de energía entre ellas. La función $-H$ de Boltzmann puede crecer en el proceso de reacomodo de las moléculas en cuanto a posición y dirección de sus velocidades, pero como no cambia la magnitud de las velocidades (mantienen su distribución inicial), entonces se alcanza un máximo dependiente de las condiciones iniciales, pero no el máximo absoluto que correspondería a la distribución Maxwell-Boltzmann. Eso mismo pasa con el modelo de radiación de Planck. Nos dice Ehrenfest:

Por lo tanto, la radiación no es capaz, en general, en un modelo aislado, de alcanzar un estado que se caracterice por una estabilidad absoluta. En el modelo

²⁷² Véase el apéndice 4.1 de esta tesis, p. 250.

²⁷³ Véase el apéndice 4.2 de esta tesis, p. 253.

²⁷⁴ Kuhn (1987, pp. 185-186) explica que este modelo lo había venido trabajando con anterioridad, por lo menos 5 meses antes, dando evidencia de ello por medio de apuntes que Ehrenfest llevaba en sus cuadernos de trabajo.

Planckiano hay infinitas formas de radiación no negra perfectamente estables. Esto se puede demostrar de manera especialmente simple con la ayuda de un método dimensional.²⁷⁵

Ese método dimensional era el que había usado en su artículo anterior. Ahora podía concluir con mayor certeza que los osciladores lineales de Planck, al interactuar con el campo electromagnético no llevan a una distribución espectral única. Así como en el modelo idealizado del gas las moléculas no interactúan produciendo una redistribución de las velocidades, así en el modelo de Planck, los osciladores de diferentes frecuencias no intercambian energía y por lo tanto no se altera la distribución de frecuencias en el campo de radiación. Ahora bien, habiendo descubierto este carácter incompleto en la teoría de Planck de los resonadores, Ehrenfest vuelve a lo que él llama “segunda” teoría, que la considera “independiente” de la teoría de los resonadores. La identifica como la teoría de las *complexiones*. Ehrenfest argumenta en torno a estas ideas pero más conectado a los métodos de Rayleigh y Jeans²⁷⁶ que consistían en aplicar a la radiación el mismo principio de equipartición que había sido usado con gran éxito en el caso de los gases. Así como en un gas la energía total del sistema se dividiría por igual (en promedio) entre todas las moléculas, en el caso de la radiación, la energía total se dividiría por igual entre todas las posibles frecuencias de vibración.²⁷⁷ Ehrenfest llega a los mismos resultados imposibles de la ley de Rayleigh-Jeans que dan una función de distribución espectral no acotada, que crece indefinidamente con la frecuencia, y por lo tanto imposible, pero aplicando el método de *complexiones*. Al final, Ehrenfest se pregunta “¿Por qué medios la teoría de Planck logra hacer inocuos los muchos tonos superiores ultravioletas de la cavidad, de manera que no absorban toda la energía como con Rayleigh y Jeans, sino que más bien la curva espectral decrezca después del ultravioleta?”²⁷⁸ La manera de Planck, aunque no la única, según

²⁷⁵ Véase el apéndice 4.2 de esta tesis, pp. 253-254.

²⁷⁶ Kuhn (1987, p. 198) lo caracteriza como una aplicación de la teoría de las *complexiones* (combinatoria) directamente al campo.

²⁷⁷ El problema aquí es que el número de moléculas es finito, en tanto que el número de posibles frecuencias de vibración no tiene límite. Si nos imaginamos un cubo (el cubo de Jeans) y la vibración a lo largo de uno de sus lados, se pueden acomodar vibraciones estacionarias que contengan múltiplos de media longitud de onda hasta el infinito. Véase Gamow (1985, p. 12-15).

²⁷⁸ Véase el apéndice 4.2 de esta tesis, p. 259.

Ehrenfest, es la introducción de la condición adicional de que la energía de los osciladores esté cuantizada y dependa de la frecuencia, con la cual se puede contestar esa pregunta al menos de manera formal, pero quedando el carácter físico de la hipótesis sin resolver: Al depender el elemento discreto de la frecuencia ($h\nu$), dada una energía finita total del sistema, queda automáticamente restringida la capacidad de las vibraciones de alta frecuencia para apropiarse de energía adicional.

Para concluir esta sección vale la pena resaltar que la función de Planck fue plenamente aceptada por la comunidad científica por su concordancia con la observación en el laboratorio de las características de la radiación del cuerpo negro.²⁷⁹ Pero no se puede decir lo mismo de sus métodos de justificación, que para muchos resultaron incomprensibles y no fue sino hasta 1905 cuando otros científicos, entre ellos Ehrenfest y Einstein, trataron de profundizar sobre las implicaciones físicas del nuevo concepto del cuanto.

4.1.3 El cuanto de Einstein: Ehrenfest señalando una diferencia crucial.

Por el momento nos apartaremos de una presentación secuencial de los trabajos de Ehrenfest relacionados con el surgimiento de las primeras ideas cuánticas para referirnos a un artículo que escribió más tarde, en 1914, y que es otro claro ejemplo del estilo agudo y puntual tan característico de Ehrenfest para señalar de manera sencilla una idea, un concepto, desnudándolo de sus complejidades y haciéndolo aparecer de una manera diáfana. Pero como el tema que trata Ehrenfest en ese artículo tiene que ver, en parte, con la diferencia entre el cuanto de Planck y el cuanto de Einstein, nos referiremos brevemente al trabajo de este último en el tema de la discontinuidad cuántica para luego volver con Ehrenfest.

²⁷⁹ Nos dice Pais (1984, p. 378) que “desde 1900 hasta 1905, la fórmula de la radiación de Planck fue considerada generalmente como ni más ni menos que una exitosa representación de los datos”. Podemos agregar que dicha concordancia se mantuvo a lo largo del siglo en diferentes escenarios y en diferentes rangos de temperaturas y frecuencias. Por ejemplo en tiempos relativamente recientes, en 1990, las mediciones de la radiación de fondo en el espacio, presumiblemente resultantes del Big Bang, y tomadas por el satélite llamado *Cosmic Background Explorer* (COBE) muestran que esta radiación sigue la ley de Planck de manera muy precisa para temperaturas muy bajas, cercanas al 0 absoluto.

Veamos en palabras propias de Einstein, cuál era su posición respecto al trabajo fundamental de Planck en el que deriva la ley de distribución y en el que aparece por primera vez el elemento de energía $\epsilon = hv$, el cual tiene un valor finito pues, como ya lo hemos visto, Planck no aplica el límite $\epsilon \rightarrow 0$:

Esta forma de razonamiento no hace obvio el hecho de que contradice las bases mecánicas y electrodinámicas, sobre las que, por lo demás, la derivación depende. Sin embargo, en realidad, la derivación presupone implícitamente que la energía puede ser absorbida y emitida por el resonador individual sólo en cuantos de magnitud hv , es decir, que la energía de una estructura mecánica capaz de oscilar, así como la energía de la radiación, se puede transferir sólo en esos cuantos, en contradicción con las leyes de la mecánica y la electrodinámica.²⁸⁰

La contradicción, según Einstein, era fundamental con la mecánica, pero no tan fuerte con la electrodinámica pues consideraba que la expresión para la distribución de la energía derivada por Planck era compatible con las leyes de Maxwell aunque no era una consecuencia necesaria de ellas. Sin embargo, Planck nunca consideró estar contradiciendo los principios fundamentales de su disciplina, a pesar de los «actos de desesperación»²⁸¹ en los que tuvo que incurrir para derivar su fórmula de distribución. En cambio, para Einstein, la teoría electromagnética se encontraba en situación de tener que ser replanteada. Escribió un artículo en 1905,²⁸² al que tiempo después describió como revolucionario, en el que empezaba destacando que

²⁸⁰ Véase Einstein (1970a, p. 45).

²⁸¹ Particularmente Planck se refiere al paso estadístico que tuvo que dar en su demostración como “un acto de desesperación (...) Tenía yo que obtener un resultado positivo, en cualquier caso y a cualquier costo”. Citado en Pais (1984, p. 374).

²⁸² El artículo se titula *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* (Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz). Se puede consultar en Stachel (2001, pp. 161-178). Einstein fue acreedor al premio Nobel en 1921 por este trabajo “por su contribución en la física teórica, en especial por su interpretación del efecto fotoeléctrico”.

existe una profunda diferencia formal entre los conceptos que se han formado los físicos acerca de los gases y otros cuerpos ponderables, y la teoría de Maxwell de los procesos electromagnéticos en el denominado espacio vacío²⁸³

y se propone demostrar que

en la propagación de un rayo de luz emitido desde una fuente puntual la energía no está distribuida de forma continua sobre volúmenes de espacio cada vez mayores, sino que consiste en un número finito de cuantos de energía localizados en puntos del espacio que se mueven sin dividirse, y sólo pueden ser absorbidos o generados como unidades completas.²⁸⁴

Es decir, el planteamiento de Einstein sí es verdaderamente radical y revolucionario, otorgándoles a los cuantos un carácter físico explícito, a diferencia de Planck para quien los cuantos tenían solamente un carácter formal, es decir, constituían sólo parte del proceso de demostración.

Regresemos ahora al trabajo de Planck. Existen en él dos elementos incomprensibles desde el punto de vista de los métodos tradicionales y ambos tienen que ver con los artificios metodológicos introducidos con el propósito de poder “contar” las posibles disposiciones del sistema. El primero, como ya se ha mencionado, tiene que ver con no tomar el límite para restaurar el continuo después de hacer la cuantización. Planck no lo hace, no porque eso le parezca más razonable, sino porque el dejar los elementos de energía de tamaño finito lo conduce a la fórmula que él buscaba. El segundo, es el método de “conteo” propiamente dicho. En la sección anterior mencionamos que Planck hizo algo similar con sus resonadores a

²⁸³ La “profunda diferencia” consiste en que los gases se consideran formados por partículas discretas, las moléculas, en tanto que el campo es continuo, lo que para la mentalidad de Einstein constituye una afrenta a la unidad de la naturaleza. El programa unificador de Einstein se destaca de manera especial en sus principales trabajos de 1905. Por ejemplo en su famoso artículo *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* (Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimientos), que da origen a la teoría de la relatividad especial, plantea que “cuando se aplica a cuerpos en movimiento, la electrodinámica de Maxwell tal como hoy se entiende normalmente conduce a asimetrías que no parecen ser inherentes a los fenómenos” y se propone eliminar dichas asimetrías partiendo de nuevos supuestos que harían del éter lumínico un concepto superfluo. En general la estructura de sus artículos es ésta: mostrar el carácter incompleto de las teorías aceptadas en el momento, proponer una nueva teoría, y finalmente sugerir las situaciones experimentales que podrían darle validez a las ideas presentadas.

²⁸⁴ Véase Stachel (2001, p. 162).

lo que había hecho Boltzmann con las moléculas de un gas, pero no enfatizamos las diferencias y ahora es momento de hacerlo. Boltzmann consideraba una distribución del gas como el conjunto de números w_0, w_1, w_2, \dots , donde w_k representa el número de moléculas que tienen $k\epsilon$ energía. El número de complexiones que dan lugar a esa distribución era $N! / (w_0!w_1!w_2! \dots w_p!)$. Posteriormente calculaba la distribución que maximizaba esa expresión para llegar así a la condición de estabilidad térmica. Planck lo que hizo fue, dada una energía total P , contar el número total de formas en que se puede distribuir esa energía en N resonadores, para lo cual usa la expresión combinatoria $R = (N+P-1)! / (N-1)! P!$ y posteriormente utiliza esta expresión para calcular la entropía sin aplicar ningún proceso de maximización.²⁸⁵

En octubre de 1914 Ehrenfest, después de casi dos años de haber sustituido a Lorentz en Leiden, le envió al mismo Lorentz el manuscrito de un pequeño artículo que escribió junto con el profesor Kamerlingh Onnes, donde le expresaba cómo se había divertido pensando en el problema ahí tratado.²⁸⁶ El artículo se titulaba *Simplified Deduction of the Formula from the Theory of Combinations Which Planck Uses as the Basis of his Radiation Theory* (Deducción Simplificada de la Fórmula de la Teoría Combinatoria Usada por Planck como Base de su Teoría de la Radiación)²⁸⁷ El propósito del artículo, como lo indica el título, era dar una demostración simplificada de la fórmula para R que escribimos en el párrafo anterior y que Planck simplemente había usado sacándola de la teoría combinatoria. En lugar de utilizar un proceso de inducción matemática como normalmente se hace para demostrar este tipo de fórmulas, Ehrenfest utilizó un procedimiento más intuitivo que ponía de manifiesto la razón del término $N-1$ en la ecuación, pero al mismo tiempo, hacía algunas anotaciones en un apéndice y en un pie de página que resultan más interesantes para nuestros propósitos. En su acostumbrado afán por usar ejemplos,

²⁸⁵ Kuhn (1987, p. 134) nos aclara esto diciendo que “en el problema de Planck, que no en el de Boltzmann, (...) cualquier conjunto de las w_k que satisfaga estas restricciones [que la suma de las w_k es igual a N y que la energía total de elementos de energía es P] corresponde a la misma distribución de la energía total”. Esto es así, nos explica Kuhn, porque Planck “desde el principio supone que está manejando resonadores ya en equilibrio con el campo de radiación” y por lo tanto “no hay lugar para nuevas maximizaciones” y por eso hace el cálculo considerando resonadores de una sola frecuencia.

²⁸⁶ Véase Klein (1985, p. 255).

²⁸⁷ Se publicó originalmente en Proc. Academ. Amsterdam 17 (1914), p. 870. Se puede consultar en Ehrenfest (1959, pp. 353-356).

analogías y modelos conceptuales simples que mostraran lo esencial de un problema,²⁸⁸ Ehrenfest plantea el problema de la distribución de los P elementos de energía entre los N resonadores con el siguiente modelo:

En una barra cuya longitud es un múltiplo P de una longitud dada, se han hecho marcas a las distancias ϵ , 2ϵ , etc., con respecto a uno de los extremos. La barra se corta solamente en las marcas y las piezas resultantes pueden volverse a unir en número y orden arbitrarios, siendo las barras resultantes indistinguibles entre sí excepto probablemente por la longitud. La pregunta es, de cuántas maneras diferentes se puede dividir la barra y colocar las barras resultantes en un cierto número de cajas distinguibles entre sí como la primera, la segunda, ... la N -ésima, con la condición de que ninguna caja puede contener más de una barra. Si las cajas, que pueden pensarse como rectangulares, se colocan una al lado de otra en línea, forman un todo con $(N-1)$ particiones formadas por dos paredes, y ahora nos podemos imaginar que estas dobles particiones se pueden cambiar de posición, pero dejando las cajas donde están.

Lo relevante de todo este juego, es que nos lleva a pensar en el carácter distinguible de los N resonadores y el carácter indistinguible de los P elementos de energía, por lo que para Ehrenfest los elementos de energía de Planck eran sólo una herramienta formal para el cálculo. No ocurría lo mismo con los cuantos de Einstein para quien tendría que haber N^P posibles combinaciones al distribuir cada uno de los P elementos de energía en los N resonadores. Si los cuantos de energía han de tener una realidad física, con la cuenta de Planck dichas partículas tendrían que tener propiedades muy extrañas y diferentes a las de cualquier partícula considerada previamente en la física.²⁸⁹ Ehrenfest resume sus especulaciones diciendo:

La hipótesis de Einstein conduce necesariamente a la fórmula (...) para la entropía y por lo tanto necesariamente a la fórmula de radiación de Wien, no a la

²⁸⁸ Recordemos por ejemplo el modelo de las urnas o “modelo de los perros y las pulgas” discutido en el capítulo 3.

²⁸⁹ Pais (1984, p. 375) nos dice que de hecho esta forma de conteo hecha por Planck de particiones de objetos indistinguibles entre sí, “anticipa la cuenta de Bose-Einstein un cuarto de siglo más tarde [y] no puede ser justificada por ningún esfuerzo de imaginación clásica”. Con la cuenta de Boltzmann no ocurría lo mismo pues para él “la cuestión era determinar la manera más probable en la que un número fijo de moléculas de gas distinguibles, con energía total fijada, podían ser distribuidas en las celdas del espacio de fase”.

de Planck. La *herramienta formal* de Planck (la distribución de P elementos de energía entre N resonadores) *no se puede interpretar en el sentido de los cuantos de luz de Einstein*.

Para cerrar esa sección, diremos que, ayudados por el análisis de Ehrenfest, nos podemos dar cuenta de que, sujeto a una necesidad para justificar teóricamente sus resultados, Planck recurre a estrategias no del todo convincentes para todos, pero que le permiten sentar las bases, sin que él estuviera consciente de eso, de una nueva interpretación del mundo físico. Entre esas estrategias, se encuentra su forma de conteo, que pudiendo haberlo hecho de manera diferente, distinguiendo, por ejemplo, entre osciladores o entre cuantos, lo hace evidentemente en la forma en que él mismo sabía que lo conducía a la forma espectral correcta, motivo suficiente para no cuestionarse mucho más sobre sus procedimientos.

4.2 La necesidad del cuanto y la crítica de Ehrenfest

La deducción de Planck de la ley de radiación del cuerpo negro usando la electrodinámica clásica, pero introduciendo a la vez una discontinuidad, ponía de manifiesto una inconsistencia.²⁹⁰ Ehrenfest había puesto de manifiesto la incapacidad de los osciladores de Planck, que éste usaba para representar la materia, para llevar a la radiación a un estado de equilibrio térmico, debido al carácter lineal de las ecuaciones involucradas en ese modelo (tanto las ecuaciones de Maxwell como las que describen el movimiento de los osciladores). Por otro lado, el mismo Planck trató de limitar el papel de la hipótesis cuántica, reservando la cuantización de los valores de energía a los osciladores y pretendiendo que los principios clásicos pudieran preservarse.²⁹¹ Todo este estado de cosas colocaba en un nivel un tanto incierto la

²⁹⁰ Véase García-Colín (2004, p. 66).

²⁹¹ En la sexta conferencia de un conjunto de ocho lecciones que dictó en 1909 en Nueva York, decía Planck: “yo soy de la opinión de que en la actualidad no es necesario proceder de semejante forma revolucionaria, y que se puede salir adelante con éxito buscando el significado del cuanto de energía $h\nu$, únicamente en las acciones mutuas con las que los osciladores se influyen entre sí”, citado en Sánchez Ron (2001, p. 140).

necesidad del cuanto, asunto que Ehrenfest decidió revisar y que dio lugar a un artículo en 1911.

Einstein, con su concepción más radical del cuanto de luz, sugería que éste jugaba un papel en otros fenómenos en los cuales la luz se creaba o transformaba.²⁹² En los años posteriores a su publicación de 1905, los resultados experimentales y teóricos en torno a estos y otros problemas físicos (por ejemplo, el asunto de los calores específicos) empezaron a convencer a la comunidad científica de que la hipótesis del cuanto jugaría un papel muy importante en los futuros desarrollos de la física. Walther Nernst fue uno de los más entusiastas defensores de la nueva teoría y convocaría a un congreso (el primer congreso Solvay) en 1911, poco después de la publicación del artículo de Ehrenfest, donde se trataría de definir los nuevos rumbos que debería de seguir la física.

4.2.1 El artículo de Ehrenfest de 1911

En 1911, un año antes de llegar a Leiden para sustituir a Lorentz y viviendo aún en San Petersburgo,²⁹³ Ehrenfest escribió un artículo en el que contribuyó de manera significativa al problema de clarificar el status de la teoría cuántica, particularmente en revisar críticamente el papel que jugaba el cuanto de luz en la teoría de la radiación térmica, con el objetivo de obtener pistas que permitieran la cuantización de otros sistemas, más allá de los osciladores Planckianos.²⁹⁴ La deducción de Planck de su ley de radiación contenía elementos aparentemente arbitrarios, lo que hacía

²⁹² En su artículo de 1905 Einstein menciona particularmente el efecto fotoeléctrico (en el que la energía de radiación ultravioleta incidente se usa para liberar electrones en un metal y darles energía cinética) y la fluorescencia (que consiste en la absorción por ciertas sustancias de luz de longitudes de onda corta que luego reemiten longitudes de onda más largas).

²⁹³ Ehrenfest se mudó de Gotinga a San Petersburgo junto con su esposa en 1907, donde vivieron por 5 años. Ahí fue donde Ehrenfest empezó a organizar semanalmente reuniones informales de la comunidad de físicos del lugar, idea que continuó con gran éxito en Leiden a partir de 1912 (Ehrenfest colloquium). Fue en esa ciudad rusa donde conoció a quien sería uno de sus mejores amigos, Abram Fedorovich Joffe y con quien compartiría intereses muy cercanos en la física. Sobre el establecimiento de Ehrenfest en San Petersburgo y sus relaciones científicas en ese lugar, véase Klein (1985, pp. 83-93). Tanto Ehrenfest como Joffe se ocuparon en esos años, entre otras cosas, de revisar el status de la hipótesis cuántica y de justificar su necesidad de acuerdo con los datos experimentales.

²⁹⁴ Véase Klein (1985, p. 12).

cuestionable la necesidad de la cuantización. Lo que Ehrenfest se propuso encontrar, según el título de su artículo de 1911 fue: *Welche Züge der Lichtquantenhypothese spielen in der Theorie der Wärmestrahlung eine wesentliche Rolle?* (¿Qué aspectos de la hipótesis del cuanto de luz juegan un papel esencial en la teoría de la radiación térmica?)²⁹⁵. La importancia de este artículo ha sido señalada, y su contribución ha sido analizada, por otros autores,²⁹⁶ por lo que en este espacio sólo destacaremos de manera resumida algunas de las ideas principales, para usarlas posteriormente como punto de partida de otras aportaciones de Ehrenfest que se discutirán en el capítulo siguiente.

Desde sus artículos de 1905 y 1906, la preocupación de Ehrenfest en relación con el trabajo de Planck había sido dilucidar de qué manera encajaba esa combinación de electromagnetismo, de mecánica estadística y de la nueva hipótesis cuántica que conducían a la ley de radiación de Planck. ¿Cómo darle sentido a todo eso? En la sección 4.1.2 veíamos que en el artículo de 1906 Ehrenfest trató de seguir las ideas de Planck, pero aplicando la teoría de las *complexiones* directamente al campo (no a los resonadores) usando el principio de equipartición a los modos normales de vibración, procedimiento que lo conducía a la ley de Rayleigh-Jeans. Al preguntarse cómo es que la teoría de Planck evitaba el crecimiento infinito de la función de distribución para frecuencias altas,²⁹⁷ veía que la manera de Planck era introducir la cuantización de sus osciladores. En su nuevo artículo de 1911, Ehrenfest trata de conjuntar tres elementos en su análisis: las propiedades que debe satisfacer la función de la radiación del calor, el análisis de los modos normales de oscilación según la teoría electromagnética y el tratamiento probabilístico.

²⁹⁵ Fue publicado en los *Annalen der Physik*, volumen 36. Se puede consultar en Ehrenfest (1959, 185-212). Una parte del artículo está traducida al español en esta tesis en el apéndice 4.3.

²⁹⁶ Véase Klein (1985, pp. 245-254) y Navarro & Pérez (2004).

²⁹⁷ En el artículo de 1911, Ehrenfest acuñó la expresión “catástrofe del ultravioleta” para este crecimiento sin límite de la función de distribución, y que sería después ampliamente usada por la comunidad científica. Esta frase ejemplifica de manera contundente el sentido de drama que se vivía en relación con la necesidad de renovar los principios de las ciencias físicas.

En la sección 1 de su artículo, Ehrenfest resume las propiedades asintóticas de la radiación del cuerpo negro.²⁹⁸ Según la ley de desplazamiento de Wien, la función de distribución espectral debe cumplir con $K(T, \nu) = \nu^3 f(\nu/T)$. Esta ley, deja sin especificar la forma de la función $f(\nu/T)$, que puede cambiar según las consideraciones adicionales que se apliquen.²⁹⁹ Ehrenfest trata precisamente de identificar las restricciones para la función $f(\nu/T)$. Se refiere, entre otras cosas, a la “demanda del rojo” (frecuencias bajas), donde $f(\nu/T)$ tiene que corresponder con la ley de Rayleigh-Jeans, la “demanda del violeta” donde $f(\nu/T)$ tiene que ser de tal manera que la energía permanezca finita y la “demanda del violeta reforzada” donde $f(\nu/T)$ tiene que corresponder con la ley de Wien que no sólo evita que la energía crezca infinitamente, sino que además se ajusta perfectamente a las mediciones en el laboratorio de la radiación.

En la siguiente sección de su artículo, que es muy breve, presenta una expresión demostrada por Planck sobre la densidad de modos normales de vibración en un cubo de longitud l ³⁰⁰ y además hace referencia a un proceso adiabático, aunque aquí no lo llama así, que jugará un papel muy importante en los futuros desarrollos de Ehrenfest en torno a la hipótesis cuántica, por lo que consideramos relevante presentarlo aquí con sus propias palabras. Nos dice Ehrenfest:

Si empujamos, acercando entre sí, las paredes del cubo, muy lentamente haciéndolo cada vez más pequeño, de la misma manera aumentará (a expensas del trabajo llevado a cabo contra la presión de la radiación) la energía parcial de todas las oscilaciones naturales de manera proporcional a la frecuencia ν (...) ³⁰¹

Es decir que una frecuencia dada ν pasa a otra ν' y su energía pasa de un valor E_ν a un valor $E'_{\nu'}$, tal que el cociente de la energía entre el valor de la

²⁹⁸ Como se mencionó en la sección 4.1.1, la ley de Rayleigh-Jeans concuerda con los resultados experimentales para frecuencias bajas, y la ley de Wien para frecuencias altas.

²⁹⁹ Por ejemplo, la ley de Wien, de carácter heurístico, mencionada en la nota 298, utiliza para la función $f(\nu/T)$ una forma exponencial decreciente.

³⁰⁰ Véase nota 277. Dicha densidad depende de ν^2 debido a que a mayor frecuencia, mayor número de oscilaciones normales habrá para un intervalo dado de frecuencias. De aquí que para evitar la “catástrofe del ultravioleta”, Ehrenfest recurra a la asignación de un factor de peso probabilístico.

³⁰¹ Véase el apéndice 4.3 de esta tesis, p. 263.

frecuencia se mantiene sin cambio (E/v es una invariante adiabática). Esta relación la usa posteriormente para derivar la ley de desplazamiento de Wien.

Respecto al tratamiento probabilístico, Ehrenfest busca una clarificación de la teoría cuestionando el principio de equipartición, asignando una función de peso al espacio de fase, en este caso de los modos normales de oscilación (función de densidad de probabilidad $\gamma(v, E)$ en función de la frecuencia y la energía), punto de vista que Planck había pasado enteramente por alto, en el sentido de no estar plenamente consciente de que su teoría implicaba este alejamiento del principio de equipartición.³⁰² El objetivo que se planteó Ehrenfest fue encontrar la forma de dicha función de peso a la luz de lo planteado anteriormente, es decir, de las propiedades teóricas y experimentales de la radiación del cuerpo negro. Los argumentos son muy técnicos, pero en forma resumida lo que desarrolló y encontró fue lo siguiente: Aplicó la función de peso al espacio de fase básico y siguió los métodos de Boltzmann,³⁰³ pero de manera más apegada que Planck, es decir, ahora sí calculando el máximo de la función $\ln W$ que representa la entropía, encontrando por tanto la distribución de Boltzmann pero modificada por su factor de peso $\gamma(v, E)$. Ahora tenía que comparar esa expresión y hacerla coincidir con las propiedades asintóticas de la radiación del cuerpo negro, sumado al hecho, mencionado en el párrafo anterior, de que la entropía no cambiaría al pasar por un proceso como el de la compresión de la región que contiene la radiación. Esto conduce a que el factor de peso debe tener la forma $\gamma(v, E) = Q(v)G(E/v)$, que se puede mostrar que es equivalente a la ley de desplazamiento de Wien.³⁰⁴ Además, Ehrenfest demuestra que la “demanda del violeta” no se puede satisfacer con un dominio continuo de $G(q)$. De la generalización de estos análisis, Ehrenfest llega a considerar funciones de peso $G(q)$ discretas con las cuales llega a la conclusión de que para evitar la *catástrofe del*

³⁰² Stehle (1994, p. 124) comenta precisamente, en relación al trabajo de Planck, que resulta muy extraño que al adoptar los métodos de Boltzmann, no haya tenido en cuenta las implicaciones del principio de equipartición de energía para la radiación del cuerpo negro, pero que en todo caso su omisión inicial resultó afortunada pues su consideración habría interrumpido o estropeado su argumentación.

³⁰³ Siguiendo la analogía, por supuesto, de equiparar el número de modos normales de oscilación de las diferentes frecuencias con el número de átomos en un gas.

³⁰⁴ $Q(v)$ es un factor irrelevante ya que no influye en la distribución de energía espectral.

ultravioleta, se requiere que cada modo de frecuencia ν requiera, para ponerse en vibración, de una cantidad finita de energía proporcional a su frecuencia, estableciendo así la condición de cuantización de Planck como necesaria y suficiente para la distribución de radiación de Planck.³⁰⁵ En la última sección de su artículo, Ehrenfest resalta estas ideas, a manera de conclusión, diciendo que “un descenso suficientemente rápido de la curva de radiación para valores de ν que crecen sin límite, solamente se puede conseguir si los resonadores presentan algún tipo de *umbral de excitación* cuyo valor es proporcional a la frecuencia del resonador”.

El juego de conceptos que Ehrenfest trabajó en este artículo, le sirvió de base para la formulación posterior, y que discutiremos en el siguiente capítulo, de su hipótesis adiabática, que junto con el principio de correspondencia de Niels Bohr funcionó como principio heurístico que guió a los nuevos físicos en el proceso de desvelar la nueva física cuántica.³⁰⁶

4.2.2 Una circunstancia desafortunada: La conferencia Solvay, Poincaré y Ehrenfest.

En el primer párrafo de su artículo de 1911, Ehrenfest se refería al hecho de que la hipótesis cuántica se había estado aplicando “a un círculo rápidamente creciente de preguntas que sólo tienen una vaga conexión con el problema de la radiación del calor”³⁰⁷, y sugería que el destino de dicha hipótesis se decidiría seguramente con los resultados experimentales que se fueran dando en las nuevas áreas de aplicación. La situación en ese año era ya muy diferente de la que se tenía en 1905 y 1906, fechas de las primeras publicaciones de Ehrenfest sobre el tema, cuando “salvo en calidad de una enigmática constante universal característica de todas las principales leyes de

³⁰⁵ En otras palabras, regresando de nuevo a la pregunta que se hacía en 1906, es decir, cómo es que la teoría de Planck evitaba el crecimiento infinito de la función de distribución para frecuencias altas, ahora, la respuesta adquiere, por medio de la función de peso, un mayor rigor matemático: a frecuencias muy altas, la probabilidad de que la energía se distribuya en los correspondientes modos normales, disminuirá (Navarro & Pérez, 2004, p. 114).

³⁰⁶ Véase Waerden (1968, p. 4).

³⁰⁷ Véase el apéndice 4.3 de esta tesis, p. 260.

la radiación de cavidad, el cuanto no estaba apenas en la conciencia profesional”.³⁰⁸ Para mediados de 1910 ya había muchos “conversos”, siendo uno de los principales Walther Nernst, quien era profesor y director del Instituto de Química Física de la Universidad de Berlín. La posición de Nernst era de tipo pragmática, pero enfática, como lo muestra una conferencia que dictó ese año en la que decía:

En este momento la teoría cuántica es esencialmente una regla para calcular, puede decirse una regla con las propiedades más curiosas, grotescas en verdad. Sin embargo (...) en manos de Planck y Einstein ha producido tan ricos frutos, que existe la obligación científica de tomar posición con respecto a ella, y someterla a prueba experimental.³⁰⁹

Nernst mismo asumió la responsabilidad de reunir a los físicos teóricos y experimentales más destacados y conocedores de la hipótesis cuántica con objeto de que la comunidad científica definiera los caminos a seguir dado el momento de incertidumbre impuesto por los nuevos desarrollos. La reunión fue posible gracias al apoyo económico del químico belga y también exitoso empresario Ernst Solvay. La reunión, conocida como el primer Congreso Solvay, tuvo lugar del 30 de octubre al 3 de noviembre de 1911 en Bruselas, siendo el tema de la misma *La teoría de la radiación y los cuanta*, y asistieron, por invitación personal, personalidades como A. Einstein, M Planck, H. A. Lorentz, M. Curie, H. Poincaré. E. Rutherford, etc. En la conferencia de inauguración, Lorentz, a quien se le asignó la presidencia de la reunión, hacía referencia a “las antiguas teorías [que] se han mostrado cada vez más impotentes para penetrar las tinieblas que nos rodean por todas partes” y asentaba que “ante semejante estado de cosas, la bella hipótesis de los elementos de energía (...) ha sido un precioso rayo de luz”.³¹⁰

Ehrenfest no fue invitado a ese primer Congreso Solvay. El había terminado su artículo en julio de ese año y apareció publicado en octubre, justo antes del Congreso. Sin embargo, dicho trabajo ni siquiera fue tomado en cuenta en las

³⁰⁸ Véase Kuhn (1987, pp. 266-267).

³⁰⁹ Citado en Pais (1984, p. 401).

³¹⁰ Citado en Sánchez Ron (2001, p. 204).

discusiones que se dieron en Bruselas,³¹¹ a pesar del hecho de que en ese trabajo Ehrenfest había clarificado varios de los puntos que se debatieron ahí, o al menos eso es lo que se deduce de las memorias y reportes sobre diferentes temas que se utilizaron en el Congreso en los que no se hace ninguna mención de él.³¹² A esta situación contribuyó también el hecho de que Ehrenfest se hallaba aislado geográficamente y aún no gozaba de mucha reputación científica,³¹³ aunque esto último puede ser cuestionable si tomamos en cuenta la invitación que Lorentz le hizo pocos meses después para sustituirlo en su puesto en Leiden, lo cual habla del reconocimiento que le otorgaba uno de los físicos más respetados del momento.

Durante el Congreso se presentaron varias conferencias y se discutieron los temas de las mismas. Los secretarios del Congreso, Paul Langevin y Maurice de Broglie se encargaron de la edición de los “reportes y discusiones” que incluyó las conferencias y la transcripción de los debates.³¹⁴ Debido a que la discontinuidad implicada en la hipótesis cuántica sugería la necesidad de una revolución en los conceptos disponibles de la física, se trató de analizar durante el Congreso, entre otras cosas, si los efectos cuánticos no podrían ser explicados por medio de algún extraño mecanismo, pero manteniéndose dentro de los principios clásicos.³¹⁵ Sin embargo, la mayoría de los participantes terminaron la reunión con el convencimiento de que algunos de los principios fundamentales de la descripción clásica de la naturaleza estaban en peligro. La conferencia había cumplido su objetivo de mostrar en toda su extensión el problema del cuanto a los expertos y persuadirlos de cooperar de manera más cercana al desarrollo futuro de la teoría cuántica.

³¹¹ Dada la cercanía de las fechas es casi seguro que la mayoría de los asistentes no tenían conocimiento del trabajo de Ehrenfest o bien no había tenido tiempo de darle la importancia que tenía en relación con el tema del Congreso. Se sabe, sin embargo, que Einstein sí había leído el artículo pues lo menciona en una carta a su amigo M. Besso fechada el 21 de octubre de 1911 (Einstein, 1994, p. 96).

³¹² Véase Klein (1985, p. 251).

³¹³ McCormmach (1967, p. 51) se refiere a Ehrenfest diciendo que en el tiempo en que tuvo lugar el Congreso Solvay, “Ehrenfest era un físico relativamente desconocido viviendo en Rusia”.

³¹⁴ Véase Sánchez Ron (2001, p. 204).

³¹⁵ Véase Mehra & Rechenberg (1982, vol. I, p. 135).

Uno de los participantes que llegó con poco conocimiento del tema, pero que sin embargo tuvo una participación muy activa y que al concluir la reunión fue absorbido por el tema de la hipótesis cuántica fue el muy conocido y respetado científico francés Henri Poincaré.³¹⁶ Inmediatamente después del Congreso se dedicó a analizar la cuestión sobre si la teoría cuántica se podía o no formular en términos de ecuaciones diferenciales, llegando a la conclusión de que cualquier teoría de la que se derivara la ley de Planck tendría que contener necesariamente una discontinuidad esencial³¹⁷ y llegó a probar que no se puede dar cuenta del fenómeno cuántico por medio de una descripción clásica.³¹⁸ Poincaré presentó sus resultados ante la Academia de Ciencias el 4 de diciembre de 1911 y posteriormente en un artículo que apareció en enero de 1912 en el *Journal de physique*.³¹⁹ En ese artículo, Poincaré demostró lo que ya había demostrado Ehrenfest unos meses antes.³²⁰ Sin embargo, dada la reputación científica de Poincaré, fueron sus argumentos los que convencieron a más gente, incluyendo a escépticos como el británico Jeans,³²¹ de aceptar la necesidad de la hipótesis cuántica.

La situación resultó devastadora en el ánimo de Ehrenfest. Dado que en Rusia no había podido conseguir un trabajo fijo, en enero de 1912 se había dado a la tarea de recorrer diversas ciudades y visitar a sus colegas científicos para sondear la posibilidad de encontrar una posición académica. Estando en Leipzig se enteró de la presentación de los primeros resultados de Poincaré en diciembre de 1911. “¿Qué va

³¹⁶ Klein (1985, p. 252) menciona que Poincaré “llegó a Bruselas ignorante de la teoría cuántica”, en tanto que Sánchez Ron (2001, p. 206) nos dice que al estudiar las actas del Congreso “se hace evidente que sus conocimientos del mundo cuántico eran mínimos”.

³¹⁷ Véase Mehra & Rechenberg (1982, vol I, p. 152).

³¹⁸ Sánchez Ron (2001, p. 210) hace bien en señalarlos que “estrictamente, no es totalmente cierta la asociación que establecía Poincaré entre discontinuidad cuántica y validez de las ecuaciones diferenciales”. En efecto, ahora sabemos que la ecuación de Schrödinger que describe los fenómenos cuánticos es una ecuación diferencial en donde “la discontinuidad cuántica aparece a través de otros elementos de la teoría: de la interpretación probabilística de Born de la función de onda, y de postulados como el del colapso de la función de la onda”.

³¹⁹ McCormach (1967, pp. 43-50) nos ofrece una descripción del escrito de Poincaré de 1912.

³²⁰ Navarro & Pérez (2004, p. 136) nos advierten, sin embargo, de la imprecisión en la que podemos caer al afirmar que Ehrenfest y Poincaré obtuvieron los mismos resultados independientemente, dado que sus enfoques y puntos de partida eran muy diferentes, y consideran como asunto pendiente el llevar a cabo un análisis riguroso de las diferencias.

³²¹ Jeans de hecho se opuso fuertemente a la teoría cuántica durante el Congreso Solvay. McCormach (1967, p.53) afirma que, sin duda, fue la lectura del artículo de Poincaré la causa de su “conversión”.

a ser de mi?" escribió en su diario el 13 de enero.³²² Posteriormente, aún estando de viaje, leyó el artículo, más extenso, de Poincaré, es decir, el que apareció en enero de 1912. Evidentemente Poincaré no conocía el artículo de Ehrenfest hasta que éste le envió una copia de su trabajo. A pesar de la prioridad de Ehrenfest, fue Poincaré quien recibió todos los créditos por demostrar el carácter suficiente y necesario de la hipótesis cuántica para la derivación de la ley de radiación. Cuando Poincaré recibió el artículo de Ehrenfest, contestó diciendo que le satisfacía ver que alguien más había llegado a los mismos resultados siguiendo otros caminos,³²³ pero no tuvo tiempo, si acaso tuvo la intención, de dar crédito públicamente a Ehrenfest, pues se enfermó y murió el 17 de julio. Ehrenfest no recibió ningún crédito por su trabajo. El episodio lo ha resumido muy bien Klein diciendo

(...) el artículo de Poincaré influyó profundamente las actitudes de sus contemporáneos. En tanto que Ehrenfest podía ser ignorado y Einstein no aceptado, la autoridad de Poincaré difícilmente podía ponerse en duda. Sus argumentos fueron aceptados como *la* prueba de que la discontinuidad en la energía era absolutamente necesaria para la existencia de una energía finita en la radiación del cuerpo negro.³²⁴

Después de estos episodios siguieron acumulándose evidencias a favor de la hipótesis cuántica. En mayo de 1914, por ejemplo, Einstein le escribió a Ehrenfest haciéndole saber que

James Franck y Gustav Hertz habían descubierto que los electrones se reflejan elásticamente de los átomos de mercurio en tanto tengan velocidades [equivalentes] de hasta 4.8 volts. Con esta máxima velocidad, pierden su energía cinética [al chocar con los átomos] y emiten luz monocromática, tal que la relación, energía cinética = $h\nu$, es válida dentro de un porcentaje de error bajo (...) maravillosa inversión del fenómeno fotoeléctrico (...) brillante confirmación de la hipótesis cuántica.³²⁵

³²² Citado en Klein (1985, p. 174).

³²³ Véase McCormach (1967, p. 51).

³²⁴ Véase Klein (1985, p. 253).

³²⁵ Einstein a Ehrenfest, 25 de mayo de 1914, citado en Mehra & Rechenberg (1982, vol I, p. 153).

Este tipo de experimentos, que confirmaban la teoría de Bohr de la estructura atómica basada en la teoría cuántica, abrían una nueva era para la física.

4.3 Conclusiones

La ley de distribución espectral para la radiación del cuerpo negro, presentada por Planck en los albores del siglo XX, fue considerada por sus colegas científicos como correcta, dada la conformidad con las observaciones experimentales. Sin embargo, la demostración teórica de la misma resultó muy confusa para sus contemporáneos, sobre todo porque en ella se introdujeron elementos estadísticos, siguiendo un cierto paralelismo con la teoría de los gases, sin que la validez de dicha extensión o extrapolación de conceptos pudiera garantizarse. De hecho, si bien la aplicación de dichos métodos estadísticos en los gases se hizo resguardando la mecánica clásica, al aplicarlos a la radiación, no se pudo preservar de la misma manera el electromagnetismo clásico. Planck, al introducir los cuantos de energía, lo tuvo que hacer como recurso formal, debido a la profunda ignorancia que existía sobre el tema de la interacción entre la materia y la radiación. La introducción del postulado cuántico, junto con otras suposiciones ad hoc, hicieron que su trabajo, aún cuando pretendía partir de primeros principios tomados de la física clásica, al final resultara más un ejercicio de invención. Su trabajo marcó así el primer paso hacia el establecimiento de nuevos principios fundamentales que inaugurarían una ciencia nueva.

Nos parece que la problemática del cuerpo negro es un ejemplo sobre cómo una anomalía funciona como la semilla que, bajo ciertas circunstancias, puede germinar y dar lugar a una innovación científica y un nuevo paradigma. Según tratamos de mostrar en este capítulo, la historia de la problemática de la radiación del cuerpo negro muestra la presencia simultánea de concepciones físicas diferentes, incluso opuestas o en franca competencia entre sí, coexistiendo e interactuando de tal manera que de esa lucha nace una nueva visión, pero donde el surgimiento de los nuevos paradigmas tiene lugar a través de una continuidad de ideas. Por eso el

análisis histórico nos muestra a Planck no como una figura revolucionaria, sino como una figura de transición, quien, sin esperarlo, abrió la puerta a la física moderna. En esta interpretación, probablemente nos alejamos un poco del modo de análisis más lineal de Kuhn, puesto que estamos diciendo que existía no sólo un paradigma en la madura ciencia de la física de finales del siglo XIX sobre el que se hiciera *ciencia normal*, sino una amalgama de paradigmas competitivos (mecanicismo, teoría de campos, atomismo, fenomenismo) que, en su articulación, y con la audacia de algunos científicos de arriesgar e imaginar otras posibilidades, generaron nuevas concepciones que fueron poco a poco mostrándose como muy prometedoras. En este sentido, el estudio de este caso nos acerca y nos ejemplifica las ideas de Gerald Holton quien nos dice cómo es que

podemos entender que los científicos no necesiten asumir sustancialmente el mismo conjunto de creencias para poder comunicarse significativamente entre sí sus acuerdos y desacuerdos, y aún así logren contribuir a la mejora cumulativa y generalmente evolutiva del estado de la ciencia (...) ³²⁶

Pero este proceso en el que los científicos arriesgan e imaginan tratando de salir del nudo en que se encuentra su ciencia, requiere precisamente de los controles del análisis crítico para no perderse en la fantasía. Paul Ehrenfest tuvo un papel destacado jugando este papel crítico. Por muchos años estuvo buscando el significado de las hipótesis cuánticas introducidas por Planck y por Einstein, sopesando las diferencias, las suposiciones y las implicaciones que surgían de ellas. Aunque probablemente no tuvo, al menos en su momento, el crédito que merecía, su trabajo permitió ofrecer claves para entender los nuevos conceptos y sugerir nuevos interrogantes que se debía plantear su disciplina. En particular, su artículo de 1911 apareció en un momento crucial, en un momento de decisiones importantes sobre el rumbo que debía tomar la física, cuando el concepto del cuanto empezaba a dar frutos y surgía por tanto la necesidad de reformularlo en términos más generales que permitieran aplicarlo a situaciones distintas, más allá de los resonadores armónicos simples de Planck. El concepto de las invariantes adiabáticas que empezó a trabajar

³²⁶ Véase Holton (2003, p. 15).

Ehrenfest en 1911, tendría consecuencias importantes más adelante y contribuiría al planteamiento de nuevos principios para la nueva física.

5 Construyendo puentes hacia una nueva forma de entender la realidad física: Paul Ehrenfest y su contribución en la búsqueda de principios y nuevas interpretaciones

El primer congreso Solvay, en 1911, fue la oportunidad de que la comunidad de científicos en el campo de la física reconociera la necesidad de aceptar el cuanto como un nuevo concepto que había llegado para quedarse. En los años posteriores se siguieron acumulando evidencias a favor de la hipótesis cuántica. Como vimos en el capítulo anterior, Paul Ehrenfest había jugado un papel crucial en la búsqueda de significados de esas nuevas ideas, cuestionando el papel que deberían jugar en la física. A partir de 1911, Ehrenfest fue construyendo el concepto de invariantes adiabáticas como guía para la posible generalización de las ideas cuánticas. Su principio adiabático, junto con el principio de correspondencia de Bohr, se convirtió en una forma de establecer puentes entre la visión mecanicista y electromagnética clásica y los nuevos conceptos. En este capítulo, defenderemos la idea, siguiendo parte del trabajo de Ehrenfest y su relación con otros científicos, particularmente con Niels Bohr, de que aunque la mecánica cuántica puede entenderse como un cambio de paradigma en la visión física del mundo respecto a la visión clásica, algunos físicos se esforzaron profundamente y lograron en cierta medida, entender las nuevas teorías como una evolución y generalización natural de las anteriores.

Por supuesto que en el proceso resultó imposible no toparse con elementos finalmente inconmensurables, no comparables, entre teorías, que ponían en riesgo la construcción de lazos de unión entre ambas. Así lo identificaron Ehrenfest y Einstein a partir de ciertos experimentos cruciales que sirvieron de apoyo para la aceptación de las nuevas teorías. Particularmente, el experimento de Stern-Gerlach es comentado por ellos y resaltan, entre otros, los serios problemas de interpretación que de ahí surgen y los peligros que los resultados de dichos experimentos representan para el principio de causalidad en física.

5.1 El principio adiabático

Paul Ehrenfest fue, junto con Albert Einstein, uno de los pioneros en la investigación de la problemática cuántica. Como vimos en el capítulo anterior, su interés en torno a los fenómenos de la radiación surgió durante su estancia en Leiden en 1903 escuchando a Lorentz. En su artículo de 1911 al que ya hemos hecho referencia, Ehrenfest evidenció el carácter no sólo suficiente, sino también necesario, de la cuantización de la energía, para poder dar cuenta de las leyes de la radiación. A partir de esos ejercicios de reflexión y de clarificación en torno a la hipótesis cuántica, surgió para Ehrenfest una nueva cuestión que perseguir: la posibilidad de generalizar la hipótesis cuántica a otros fenómenos o procesos atómicos, diferentes al oscilador armónico simple. Desde el principio quedó seducido por una paradoja: aunque la teoría cuántica parecía no concordar con las teorías tradicionales, algunos resultados tradicionales seguían siendo válidos bajo la nueva perspectiva.³²⁷ Ehrenfest tenía la esperanza de que el análisis de estos resultados pudiera brindar una mejor comprensión de los enigmáticos principios cuánticos.

5.1.1 Orígenes del principio adiabático

Recordemos que en ese artículo de 1911, la invariante adiabática E/v había jugado un papel muy importante en sus argumentos. En esencia Ehrenfest había demostrado que la ley de desplazamiento de Wien era una expresión particular de la segunda ley de la termodinámica (en el sentido estadístico de Boltzmann) para un sistema de osciladores con la invariante E/v y por lo tanto con una función de peso o función de densidad de probabilidad $\gamma(v, E)$ de la forma $G(E/v)$. Es decir, la relación de Boltzmann entre la entropía y la cantidad de configuraciones con las que se puede lograr la distribución más probable seguía siendo válida precisamente porque Planck había cuantizado la invariante adiabática de los osciladores, o sea, la relación de su energía a su frecuencia. Sólo podía asegurarse la validez de la segunda ley de la

³²⁷ Véase Luntheren (2003, p. 14).

termodinámica si la función de peso estadística dependía únicamente de su invariante adiabática.³²⁸ Así, la ley de Wien que podía derivarse a partir de argumentos clásicos, se sostenía también bajo las condiciones cuánticas con la condición de que se abandonara el principio clásico de distribución uniforme del espacio de fase.³²⁹ A Ehrenfest le pareció que sería de fundamental importancia generalizar la aplicación de reglas cuánticas y establecer su relación con la mecánica tradicional.

Ehrenfest estaba seguro de que ese análisis que había hecho de la derivación de la ley de Wien podía extenderse a otros sistemas. Lo que se requería era una generalización apropiada de lo que en su análisis había sido una propiedad peculiar del oscilador armónico, la invariante E/v . En octubre de 1912 realizó en su libro de notas una serie de cálculos relacionados con el caso de partículas (moléculas) que se encuentran rebotando entre paredes perfectamente elásticas. Encontró que si las paredes se aproximan entre sí lentamente (adiabáticamente), entonces la energía cinética de las moléculas aumenta (proveniente del trabajo hecho al aproximar las paredes), y la frecuencia de las colisiones con las paredes también aumenta, de tal manera que la relación de dicha energía a la frecuencia se mantiene constante.³³⁰ Este y otros ejemplos lo llevaron a sentirse seguro de que debía existir una cantidad adiabáticamente invariante para cualquier sistema periódico. La pregunta guía que tendría ahora Ehrenfest sería: si queremos pasar del caso especial de la oscilación armónica a sistemas periódicos generales, ¿qué función análoga a E/v permanecerá constante?

Durante las vacaciones de Navidad de 1912 Ehrenfest dio un primer paso en su búsqueda³³¹. Lo que encontró fue, fundamentalmente, que para cualquier sistema periódico cuya energía depende de ciertos parámetros, la integral en el tiempo de la

³²⁸ Véase Klein (1985, p. 279).

³²⁹ Tiempo después Ehrenfest se referiría a la renuncia a ese principio clásico al escribir a Bohr que “(...) habíamos perdido, en principio, las bases de la vieja demostración de Boltzmann de la segunda ley, al seguir a Planck en el abandono del supuesto de Boltzmann de que $G \equiv 1$ ” (Ehrenfest a Bohr, 10 de mayo de 1918, citado en Klein, 1985, p. 283). Ehrenfest se esforzaría por reestablecer la armonía a través de las invariantes adiabáticas de las condiciones cuánticas.

³³⁰ Referido en Klein (1985, p. 260).

³³¹ Aunque no publicó lo que encontró sino hasta casi un año después, sí quedó asentado en una carta a su amigo Joffe fechada el 20 de febrero de 1913. En Klein (1985, pp. 261-263) se cita extensamente.

energía cinética sobre un periodo completo, es invariante cuando los parámetros cambian adiabáticamente (muy lentamente).³³² Este teorema que es, estrictamente hablando, un teorema de mecánica clásica fue considerado por Ehrenfest como la clave para la generalización de la teoría cuántica.

En mayo de 1913 tuvo lugar una conferencia internacional en Gotinga dedicada a la problemática cuántica. Ehrenfest asistió, pero no como conferencista, de manera que no tuvo oportunidad de explicar ampliamente sus ideas.³³³ Pero otros científicos sí expusieron sus ideas, algunas de las cuales tenían un marcado contraste con el enfoque de Ehrenfest. Curiosamente Planck, el iniciador de la teoría cuántica, se mantenía aún muy reticente a pesar de las nuevas evidencias a favor de la misma y consideraba que aún se podían buscar otras alternativas al uso de la teoría cuántica. Por el contrario, Peter Debye consideró que lo que se había hecho hasta ahora en torno al cuanto era tan sólo el primer escalón en esta nueva dirección.³³⁴ En ese mismo año de 1913, Niels Bohr escribió la primera parte de su trabajo *On the Constitution of Atoms and Molecules*,³³⁵ que se convertiría en uno de los trabajos más significativos en teoría cuántica. Sin embargo, la conferencia en Gotinga ocurrió antes y por lo tanto ahí no se discutieron las ideas de Bohr.

5.1.2 El modelo de Bohr y la reacción de Ehrenfest

De esta manera, en tanto que Ehrenfest se encontraba ocupado tratando de esclarecer la problemática cuántica del momento, el físico danés Niels Bohr desarrollaba ideas mucho más radicales en torno al problema de la estructura interna del átomo. Bohr aplicó la cuantización a la descripción de la energía mecánica de los electrones en un átomo partiendo del modelo planetario de Rutherford, el cual por un lado tenía bases

³³² Lo que es equivalente a decir que ante este cambio adiabático, la energía cinética promedio (K) puede aumentar o disminuir, en cuyo caso correspondientemente la frecuencia de repetición (ν) en los movimientos del sistema disminuirá o aumentará, de tal manera que el cociente K/ν permanecerá constante.

³³³ Véase Luntheren (2003, p. 15).

³³⁴ Véase Klein (1985, pp. 273-274).

³³⁵ Véase Bohr (1913).

experimentales muy sólidas, pero por otro presentaba claras contradicciones con la física clásica.

Más problemática era aún su sugerencia de que la frecuencia de la radiación emitida por un átomo no tenía nada que ver con la frecuencia de movimiento de los electrones. Esta suposición se contraponía tanto con la electrodinámica clásica como con todas las ideas conocidas sobre vibraciones o fenómenos ondulatorios. Según Bohr, la emisión de radiación era consecuencia de los cambios discretos de energía de los electrones al pasar de un estado cuántico a otro, y la frecuencia de la radiación dependía únicamente de la diferencia de energía asociada.³³⁶

Este supuesto, aparentemente absurdo, le permitió a Bohr calcular exitosamente las frecuencias específicas de la radiación emitida por el átomo de hidrógeno, deduciendo la fórmula de Balmer del espectro de ese elemento. Algunos estudiosos del tema, entre ellos Einstein y Sommerfeld, tomaron muy en serio la teoría de Bohr al quedar muy impresionados por los resultados que se obtenían con ella. En cambio, otros vieron en sus ideas sólo incoherencias sin significado alguno. Paul Ehrenfest pertenecía a los escépticos. En una carta a Lorentz se lamentaba diciendo que Bohr lo había llevado a la desesperación: “si ésta es la manera de llegar a la meta, debo renunciar a la física”.³³⁷ Ehrenfest no se esforzó, al menos por algunos años, por entender y aceptar el enfoque y las propuestas de Bohr.³³⁸ No fue sino hasta que lo conoció personalmente después de la Primera Guerra Mundial que se convirtió en amigo cercano y admirador de él. Mientras tanto, Bohr le seguiría dando mucha importancia al análisis espectral, como el mejor camino para lograr extender la teoría cuántica, en tanto que Ehrenfest seguiría de momento por su propia ruta.

Posteriormente Sommerfeld trató de averiguar la manera de ajustar algunos datos experimentales inexplicables en el modelo de Bohr. Con este objetivo en mente, introdujo reglas y números cuánticos adicionales. Con sus ajustes pudo

³³⁶ Véase por ejemplo Gamow (1966, pp. 29-46).

³³⁷ Ehrenfest a Lorentz, 25 de agosto de 1913, citado en Klein (1985, p. 278).

³³⁸ Véase Klein (1985, pp. 278-279).

ofrecer una explicación exitosa de la separación de las líneas espectrales que ocurría en presencia de un campo eléctrico (efecto Stark) o de un campo magnético (efecto Zeeman).³³⁹ Bohr, al continuar su trabajo en 1916, tomó en consideración el trabajo de Sommerfeld y escribió, a partir de 1918, una serie de artículos concernientes a la teoría cuántica en relación con la estructura atómica (teoría de Bohr-Sommerfeld) titulada *On the Quantum Theory of Line Spectra*. En su trabajo, Bohr asumía que, hasta cierto punto, la mecánica clásica seguía siendo válida; la descripción de Bohr del modelo atómico seguía conteniendo los elementos clásicos de momento, energía y posición. Por eso, un principio importante utilizado en esta serie de artículos fue el llamado principio de correspondencia, del que nos ocuparemos más adelante y que jugó, junto con la hipótesis adiabática de Ehrenfest, un papel importante como principio guía en las futuras investigaciones que permitirían la transición de la física clásica a la física cuántica.

5.1.3 Construyendo puentes: Ehrenfest y el principio adiabático³⁴⁰

Ehrenfest no publicó rápidamente sus hallazgos de 1912, pues se encontraba en un momento de transición importante en su vida, ya que acababa de reemplazar a Lorentz en su posición de físico teórico en Leiden. Sin embargo, en noviembre de 1913 se encontró listo para publicar algunas de sus ideas y escribió un ensayo titulado *A Mechanical Theorem of Boltzmann and its Relation to the Theory of Energy Quanta*.³⁴¹ Ehrenfest empieza su artículo recordando lo que ya había mostrado anteriormente en el caso de la radiación del cuerpo negro: cuando hay una compresión reversible y adiabática de las paredes del compartimento, la relación E/v aparece como invariante, siendo este resultado fundamental para la derivación de la ley de desplazamiento de Wien, y además coincide con el supuesto de Planck

³³⁹ Véase Boeyink (2005, p. 29).

³⁴⁰ Aquí se dará un recuento breve de la formulación del principio adiabático, enfocándonos a nuestro argumento de que aún en situaciones de grandes saltos conceptuales, existe una continuidad de ideas que conecta las teorías previas con las nuevas. Un análisis más detallado sobre el desarrollo de las ideas de Ehrenfest sobre la hipótesis adiabática se puede encontrar en Klein (1985, pp. 264-292), pero sobre todo en Navarro & Pérez (2006).

³⁴¹ Véase Ehrenfest (1959, pp. 340- 346).

($\epsilon = nh\nu$). Luego, a partir de aquí Ehrenfest se dispone a contestar las preguntas siguientes: “¿Existe una relación adiabática análoga [a la mencionada] si transitamos del caso de un sistema vibrando senoidalmente (...) a sistemas más generales?” y, si es así, “¿cómo se puede aplicar heurísticamente, cuando el supuesto de Plank ($\epsilon = nh\nu$) se extiende a sistemas con vibración no senoidal?”.³⁴² Ehrenfest explica que el punto de partida de su análisis será un teorema mecánico de Boltzmann. Inmediatamente después Ehrenfest menciona una posible objeción que se podría levantar en contra de su argumento: “no tiene sentido - se puede argüir - combinar una tesis, que se deriva bajo las premisas de las ecuaciones de la mecánica, con la hipótesis antimecánica de los cuantos de energía”, y se apresura a explicar que lo mostrado con la ley de Wien nos da “la esperanza de que los resultados que pueden ser derivados de la mecánica y la electrodinámica clásica por la consideración de procesos adiabáticos macroscópicos, continuarán siendo válidos en la mecánica futura de los cuantos de energía”.³⁴³

Detengámonos un momento para analizar algunas conexiones. Las ideas de Planck se habían ido aplicando poco a poco a situaciones cada vez más diversas. En todos los casos se asumía que la mecánica clásica seguía siendo válida pero se aplicaban supuestos adicionales en el sentido de que sólo ciertos valores de alguna cantidad física (la energía, por ejemplo) eran permitidos. El truco consistía en tratar de adivinar las reglas de cuantización correctas para la situación bajo estudio, o de encontrar un conjunto general de reglas de cuantización que funcionaran para todas las situaciones. Vemos ahora, en los esfuerzos de Ehrenfest, la expectativa de poder encontrar una conexión necesaria entre la teoría clásica y la futura, utilizando esta forma de razonamiento que más tarde, en 1914, Einstein bautizó como *hipótesis adiabática*.³⁴⁴

³⁴² Ibid., pp. 340- 341.

³⁴³ Ibid., p. 341.

³⁴⁴ Véase Boeyink (2005, p. 71). Es interesante recordar cómo el mismo Einstein, mucho tiempo después confesaba que “a pesar de que hoy sabemos que la mecánica clásica falla como fundamento que domine toda la física, aún ocupa el centro de toda nuestra forma de pensar en física” (Einstein, 1954, p. 300).

Desde aquí vemos con Ehrenfest, y también con Bohr, contradicciones con el concepto de inconmensurabilidad que Kuhn y Feyerabend pusieran de moda en la década de los 60's. De acuerdo con Kuhn, en una revolución científica – como sin duda lo es la revolución cuántica – no sólo resulta una teoría nueva, sino que cambia el campo de problemas científicos, los métodos científicos y el aparato conceptual, es decir, todos los ámbitos de la disciplina correspondiente; según esta visión del cambio científico, el paso de una teoría a otra se da de una manera desconectada, de manera que no es posible encontrar vínculos lógicos entre la vieja teoría y la nueva que la reemplaza. Pero vemos que esto no parece empatar con un intrincado proceso como lo fue el surgimiento de la teoría cuántica donde toda idea nueva aparece *pegada* a las viejas y se desprende, si no a través de una lógica transparente, sí al menos a través de un esfuerzo racional que busca llegar a nuevas formas de comprensión que sean compatibles con nuevos resultados experimentales.³⁴⁵ Creemos que eso es lo que aparece ejemplificado en procesos de pensamiento como los de Ehrenfest.

Regresando a nuestra historia (nos habíamos referido al artículo de Ehrenfest de 1913), en 1914 estalló el conflicto que mantendría a Europa sumida en la Guerra por más de cuatro años y que limitaría las actividades científicas.³⁴⁶ Para Ehrenfest significó perder el contacto con sus colegas rusos y con su amigo cercano Einstein, quien sólo visitó Leiden una vez durante el conflicto armado, en el otoño de 1916. El inicio de la Guerra causó un gran impacto en la percepción que Ehrenfest tenía del mundo civilizado. Lo que más le afectó, siendo él un individuo despojado de todo nacionalismo, fue el manifiesto chauvinismo de sus colegas científicos más educados y cultos de las naciones en conflicto, algunos de los cuales adoptaron la retórica de la guerra de sus líderes políticos.³⁴⁷ Ehrenfest se enteró, por ejemplo, de que Ernst Haeckel (un famoso biólogo alemán) había rechazado su grado honorario académico inglés “como si fuera una condecoración militar”, lo cual para Ehrenfest constituía

³⁴⁵ Véase por ejemplo Szumilewics (1977).

³⁴⁶ En realidad el desarrollo científico no se detuvo del todo, pero sí dificultó la comunicación entre científicos. Basta recordar que en esos años salió a la luz la Teoría General de la Relatividad de Einstein y que también siguieron los desarrollos en Teoría Atómica. Véase por ejemplo Becker (1987).

³⁴⁷ Véase Lunzeren (2003, p. 16).

una “acción (...) completamente irracional y perversa”³⁴⁸ y temía que los físicos estudiosos de la mecánica estadística en los países en conflicto quemaran ceremoniosamente los escritos de Boltzmann y Maxwell respectivamente.³⁴⁹

En este contexto histórico, algunos años después del citado artículo de 1913 y habiendo esperado por algún tiempo la reacción de sus colegas físicos, y ante la tensión de la Guerra, Ehrenfest se convenció de que era momento de poner sus ideas más en claro y de manera más general. En junio de 1916, Ehrenfest escribió el artículo titulado *On Adiabatic Changes of a System in Connection with the Quantum Theory*.³⁵⁰ Tuvo cuidado de dejar muy claros los propósitos de su investigación: “En un creciente número de problemas físicos los fundamentos de la mecánica (y la electrodinámica) clásica se han usado junto con la hipótesis cuántica, que se encuentra en contradicción con ellos. Resulta deseable, por supuesto, llegar a algún punto de vista general desde el cual se pueda discernir el límite entre las regiones ‘clásica’ y ‘cuántica’”.³⁵¹ Ehrenfest había venido usando la palabra *adiabático* en analogía con la compresión de gases adiabática usada en termodinámica. En su versión de transformación adiabática, Ehrenfest se refería a los cambios infinitamente lentos en el valor de parámetros o variables del sistema, por ejemplo, el cambio en el valor de un campo eléctrico o magnético. El principio adiabático lo expresa Ehrenfest de la siguiente manera: “si un sistema es expuesto a influencias adiabáticas, entonces los movimientos *permitidos* se transforman en otros movimientos *permitidos*”.³⁵² Durante este proceso de cambio, las invariantes adiabáticas permanecían constantes. Para movimientos armónicos simples (senoidales), Ehrenfest identificaba la invariante como E/v , en tanto que para movimientos periódicos más generales la invariante era $2T/v$, donde E representa la energía total, T la energía cinética promedio y v la frecuencia de repetición del

³⁴⁸ Carta de Ehrenfest a Lorentz, el 4 de septiembre de 1914, citada en Klein (1985, p. 299).

³⁴⁹ En este contexto también es pertinente recordar el conocido *Manifiesto al Mundo Civilizado* que salió a la luz en octubre de 1914, firmado por noventa y tres líderes intelectuales alemanes (entre ellos Max Planck), que apareció como respuesta a las críticas internacionales tras la invasión de Alemania a Bélgica (país neutral), en el que se afirmaba que la cultura y el militarismo alemán eran inseparables.

³⁵⁰ Véase Ehrenfest (1959, pp. 378-399).

³⁵¹ *Ibid.*, p. 378.

³⁵² *Ibid.*, p. 379.

sistema periódico. En casos específicos, como por ejemplo en la ley de radiación de Planck, estos invariantes producirían un múltiplo entero de la constante de Planck. Pero en el átomo relativístico de hidrógeno, no resultaba muy claro cuál era el invariante. Ehrenfest expresaba que era necesario investigar más al respecto.³⁵³

Por eso es que Sommerfeld, interesado en los efectos relativistas, no quedó muy impresionado por el artículo de Ehrenfest; esperaba algo más útil, en términos de herramientas de cálculo, del mencionado artículo. Sommerfeld le expresó en una carta a Ehrenfest³⁵⁴ su desencanto y lamentó que Ritz, dada su rica imaginación y capacidad inventiva, hubiera muerto a tan temprana edad y que no hubiera tenido oportunidad de participar en los nuevos desarrollos que tenían lugar en la física. El biógrafo de Ehrenfest, Martin Klein, opina que dicha carta debe de haber sido un golpe terrible para Ehrenfest dada su sensibilidad e inseguridad que lo caracterizaba. Los dos años siguientes, Ehrenfest se mantuvo al margen de la teoría cuántica, hasta que el trabajo de Bohr volvió a despertar su interés.

5.2 Bohr y el principio de correspondencia

Con la teoría atómica de Bohr-Sommerfeld se podía visualizar al átomo como un sistema mecánico constituido por electrones girando en torno a un núcleo cargado positivamente. Dicho modelo permitió organizar y explicar la diversidad de datos espectroscópicos que se habían acumulado durante el último siglo. Sin embargo, como se ha mencionado, en dicho modelo surgían ciertas dificultades debido a la combinación de conceptos clásicos y de las nuevas ideas cuánticas. Algunos principios fundamentales, como lo fueron el principio de correspondencia de Bohr y el principio adiabático de Ehrenfest, actuaron a manera de estrategias heurísticas en un intento de minimizar dichas dificultades. Tanto Bohr como Ehrenfest comprendieron mutuamente el valor del trabajo realizado por el otro y cultivaron una amistad que dio frutos importantes para las ciencias físicas.

³⁵³ Véase Boeyink (2005, p. 71).

³⁵⁴ Sommerfeld a Ehrenfest, 16 de noviembre de 1916, citada en Klein (1985, p. 291).

5.2.1 El principio de correspondencia

Se ha escrito mucho sobre el principio de correspondencia de Bohr, tanto en sus vertientes históricas como filosóficas.³⁵⁵ En este espacio nos referiremos sólo a algunos puntos esenciales que nos permitan introducirnos en la relación que se dio entre este importante físico y Paul Ehrenfest.

En sus primeros escritos en torno al modelo atómico, Bohr ya había utilizado algunas ideas que pueden asociarse con lo que después se conoció como *principio de correspondencia*, pero fue en la revisión general que hizo de sus ideas en 1916 donde dicho principio se convirtió en una verdadera herramienta poderosa para dilucidar nuevos modelos. Como ya se mencionó previamente, dicha revisión dio por resultado un ensayo titulado *On the Quantum Theory of Line Spectra*, el cual apareció dividido en tres partes. En la parte I,³⁵⁶ que apareció en abril de 1918, Bohr presenta una introducción general y en ella ofrece un reconocimiento especial a Einstein y a Ehrenfest por su contribución a la teoría cuántica. Se refiere particularmente al *principio adiabático* de Ehrenfest llamándolo *principio de transformación mecánica* expresando que es “de gran importancia en la discusión de las condiciones que se usan para fijar los estados estacionarios de un sistema atómico”.³⁵⁷ La parte II, publicada en noviembre de 1918, desarrolla el caso del átomo de hidrógeno, pero incluyendo ahora su estructura fina y su comportamiento bajo el efecto de campos eléctricos y magnéticos. También desarrolla una *teoría de perturbaciones*, basándose en el principio de Ehrenfest,³⁵⁸ que describe lo que pasa si las fuerzas en el interior del átomo se modifican por medio de pequeñas fuerzas externas. En la última parte, que se publicó en 1922, Bohr se ocupó del espectro de otros elementos.

³⁵⁵ Véase por ejemplo Darrigol (1992, pp. 123-127), Pais (1991, pp. 192-196), Whitaker (1996, pp. 121-123), Waerden (1968, pp. 5-8), Radder (1991, pp. 203-208), etc.

³⁵⁶ Se puede consultar en inglés en Waerden (1968, pp. 95-137).

³⁵⁷ *Ibid.*, p. 102.

³⁵⁸ Véase Pais (1991, p. 193).

En las tres partes de dicho ensayo Bohr utiliza como principal herramienta el principio de correspondencia. Su punto de partida son los dos mismos enunciados que había utilizado con anterioridad: que en un sistema atómico sólo pueden existir estados estacionarios discontinuos y que la radiación absorbida o emitida durante una transición entre dos de esos estados posee una frecuencia ν dada por $\Delta E = h\nu$, donde ΔE es la diferencia de energía entre los dos estados. Como estos supuestos indican que no existe emisión de radiación en los estados estacionarios, se sigue que las leyes ordinarias de la electrodinámica ya no son válidas. Sin embargo, Bohr asume que una buena aproximación al movimiento de las partículas en los estados estacionarios se puede obtener a partir de las reglas clásicas, aplicando la ley de Coulomb y calculando los movimientos de dichas partículas (electrones) por medio de la mecánica ordinaria. Bohr nos hace recordar también que en los estudios de la radiación del cuerpo negro, la región de frecuencias bajas puede explicarse por medio de la electrodinámica ordinaria. A partir de estas ideas Bohr sugiere que la teoría que describa estos fenómenos y que concuerde con los experimentos tendrá que ser una generalización natural de la teoría clásica de la radiación. En estas ideas se encuentra el germen del principio de correspondencia en el sentido de una expectativa de identificar una conexión necesaria entre la teoría clásica y la futura teoría esperada, conexión que Bohr identificó con el caso de la aplicación de números cuánticos grandes.

Adicionalmente al número cuántico n introducido por Bohr para representar los niveles discretos de energía, Sommerfeld había incluido otros dos, el número l que representaría diferentes elongaciones de la órbita y el número m_l que definiría su orientación. Un estado cuántico está definido por el conjunto de números cuánticos. El asunto es que, según revelaban los experimentos, no cualquier par de estados puede estar conectado por una transición (por ejemplo el número cuántico l sólo puede cambiar por una unidad). Parte del trabajo de los físicos en esta área había sido descubrir las *reglas de selección* que establecen qué transiciones son válidas y cuáles no en diferentes situaciones: presencia de un campo eléctrico, presencia de un campo magnético, etc. Bohr se abocó a descubrir cómo derivar dichas reglas de selección, y lo hizo con su principio de correspondencia.

El principio se basó en la idea de un límite clásico, como ocurría con la ley de radiación del cuerpo negro. Para el átomo de hidrógeno, Bohr se dio cuenta de que los niveles de energía se acercaban más entre sí conforme n se hacía más grande, cosa que interpretó en el sentido de que la región de valores grandes de n constituía un límite clásico.

El ejemplo más claro es el que compara la frecuencia de rotación fr de un electrón en una de sus órbitas con la frecuencia de la radiación ν que ocurre en una transición. Desde el punto de vista clásico, se esperaría que el sistema radiara energía electromagnética a la frecuencia fr . Dados los postulados establecidos por Bohr, no existe tal conexión, pues la frecuencia de la radiación depende sólo de la diferencia de energía y por lo tanto está relacionada con dos órbitas, no con una sola. Pero para valores grandes de n , las frecuencias de la radiación para las transiciones entre estados con números cuánticos $n - 1$ y n , o n y $n + 1$ son parecidas entre sí y cercanas al valor fr que se esperaría clásicamente en cualquiera de esas tres orbitas (n , $n - 1$ y $n + 1$). Además, para una transición de un valor grande de n a un valor de $n + 2$ dicha frecuencia se duplica, lo que representa la posible presencia de una frecuencia fundamental y sus armónicas (múltiplos de la fundamental) como se esperaría que ocurriera de acuerdo con las teorías clásicas. Precisamente aquí surge la conexión entre las regiones clásica y cuántica, y lo que hizo Bohr para convertir esto en una guía para descubrir las *reglas de selección* fue invertir el proceso: analizar la radiación clásicamente, determinar qué frecuencias deberían estar presentes y traducir esto último a términos cuánticos para de ahí deducir qué *reglas de selección* permitirían esas frecuencias. Aunque todo esto se podía asegurar sólo para el caso de valores grandes de los números cuánticos, Bohr se arriesgó a predecir que dichas reglas seguirían siendo válidas para transiciones entre estados con valores pequeños de los números cuánticos. Con esta herramienta Bohr pudo incorporar en su teoría no sólo las frecuencias, sino también las intensidades y las polarizaciones de las líneas espectrales. La teoría quizás no ofrecía una imagen lógica y coherente del modelo atómico pero sí adquirió gran capacidad de predicción. Al menos así lo sentía Sommerfeld quien describió el principio como “una varita mágica”, y considerando los éxitos obtenidos con ella llegó a admitir que la cuestión respecto a que los

métodos de Bohr, con su principio de correspondencia, fueran o no satisfactoriamente lógicos, era, después de todo, una cuestión secundaria.³⁵⁹

Estas explicaciones nos permiten enfatizar nuevamente que en estos procesos de descubrimiento, lejos de rechazarse las viejas teorías, se dan esfuerzos sumamente consistentes por mantener una conexión lógica, una continuidad de ideas que permitan abrazar los nuevos conceptos, de tal manera que las teorías confirmadas empíricamente no desaparecen o se tiran al basurero como falsas cuando aparecen otras teorías más nuevas, más universales, sino que conservan su importancia como caso límite de las nuevas teorías. Pero indudablemente la correspondencia entre teorías tiene sus límites y pueden establecerse diferentes niveles de la misma.³⁶⁰ En todo caso se trata de una correspondencia de carácter matemático-formal y desde luego empírica, pero que aplica sólo a ciertas partes de las teorías involucradas y más difícilmente a su naturaleza teórico-conceptual.

Lo que nos deja de enseñanza este análisis de la ciencia en su proceso de construcción es que, por un lado, el desarrollo de nuevo conocimiento no es un proceso que se pueda llevar a cabo con métodos de carácter totalmente algorítmico, es decir, que no hay reglas válidas universales que permitan generar nuevo conocimiento y, por otro lado, que en la práctica de la ciencia se pueden usar con éxito reglas heurísticas para guiar la búsqueda de ese nuevo conocimiento, reglas que sugieran direcciones generales en ese proceso de exploración. Así lo hizo Bohr, tomando muy seriamente la cuestión de la relación entre las viejas y las nuevas ideas teóricas, convencido de que la física clásica, aunque limitada en sus alcances, era indispensable para la comprensión de la nueva física que estaba surgiendo. Y asimismo lo hizo Ehrenfest, siguiendo otros caminos que dependieron más de una profunda visión crítica sobre la naturaleza de las teorías existentes, que de una imaginación creativa y original del tipo que generan estructuras teóricas radicalmente

³⁵⁹ Véase Whitaker (1996, p. 123).

³⁶⁰ Radder (1991, pp. 203-208), por ejemplo, considera tres fases sucesivas de la aplicación del principio de correspondencia en el desarrollo de la mecánica cuántica: correspondencia o acuerdo numérico, continuidad conceptual y correspondencia formal. Szegedi (1999, pp. 147-149) por su parte considera cuatro niveles de análisis del principio de correspondencia: el nivel experimental, el nivel de las ecuaciones o fórmulas matemáticas, el nivel de los modelos matemáticos abstractos y el nivel de los conceptos teóricos.

nuevas, pero contribuyendo con eso al crecimiento de su disciplina sobre bases firmes.

5.2.2 Bohr y Ehrenfest

Llama la atención el tiempo que tuvo que transcurrir para que Bohr y Ehrenfest se conocieran. Ya comentamos cómo Ehrenfest había recibido con actitud escéptica los trabajos de Bohr de 1913, sentimiento que prevaleció varios años, pues incluso ya en mayo de 1916, en una carta a Sommerfeld, llegó a hacer referencia al “monstruoso modelo de Bohr”.³⁶¹ Sin embargo, esta actitud hostil desaparecería totalmente con el tiempo tanto en el plano personal como científico.

En una conferencia pronunciada por Ehrenfest en abril de 1917 titulada *El modelo atómico de Rutherford-Bohr*, se refirió a “los resultados importantes que ha conseguido Bohr aplicando la teoría cuántica a la hipótesis atómica de Rutherford”. Pero, como era costumbre en Ehrenfest, agregó inmediatamente preguntas críticas: ¿por qué sólo existen estos movimientos permitidos? y ¿cómo transmiten luz los electrones? Enseguida, con la claridad que le caracterizaba respondió a la primera pregunta a la vez que introducía su principio adiabático en relación con los extraños paquetes de energía ϵ que sólo podían adoptar valores $nh\nu$. Respecto a la segunda pregunta, Ehrenfest señalaba que Bohr utilizaba supuestos incomprensibles pues la electrodinámica tradicional contestaría que la radiación surge de la aceleración de los electrones. Sin embargo, de acuerdo con Bohr, los electrones no radian energía durante su movimiento orbital en los estados estacionarios.³⁶²

Ehrenfest empezó a reconciliarse con los métodos empleados por Bohr al percatarse de las importantes extensiones de Sommerfeld a la teoría, pero no mostró una posición más entusiasta respecto a Bohr hasta que empezó a tener contacto directo con él. La iniciativa en realidad la tomó Bohr enviándole una carta a Ehrenfest el 5 de mayo de 1918. En dicha carta Bohr enfatizaba el aprecio que tenía

³⁶¹ Citado en Boeyink (2005, p. 28).

³⁶² Referido en Boeyink (2005, p. 30)

por el principio adiabático y explicaba qué papel jugaba en su propio trabajo relativo a la teoría cuántica generalizada de las líneas de radiación espectral. Ehrenfest contestó casi inmediatamente expresando lo contento que se sentía por lo que Bohr había escrito. Por primera vez su principio adiabático lograba atraer la atención de un físico importante. En esa carta Ehrenfest aclaraba que la palabra *adiabático* no debía ser tomada en su sentido termodinámico. Después de algunas otras consideraciones sobre el principio adiabático, Ehrenfest le hacía saber a Bohr que había oído hablar mucho de él y que tenía la esperanza de recibirlo en alguna ocasión en su casa y terminaba expresando el deseo de que en dicha reunión pudieran contar también con la presencia de Einstein.³⁶³ Tendrían que pasar 7 años para que los tres se reunieran al mismo tiempo y a partir de entonces Ehrenfest se convirtió en mediador y crítico de las famosas controversias entre Einstein y Bohr.

En la primavera de 1919, Bohr visitó por primera vez Leiden atendiendo la invitación de Ehrenfest a participar en un Congreso,³⁶⁴ lo cual se convirtió en el principio de una fuerte amistad. La actitud de Ehrenfest con respecto al trabajo y las ideas de Bohr cambió radicalmente. Resultó ahora claro para Ehrenfest que el trabajo de Bohr se dirigía en verdad a la búsqueda de una teoría coherente y se gestó una mayor empatía para con Bohr y sus ideas al percibir en él un método de trabajo más intuitivo que matemático, además de que tanto su principio adiabático como el principio de correspondencia de Bohr buscaban una conexión entre los principios cuánticos y las teorías clásicas. Eventualmente Ehrenfest quedó completamente seducido por la personalidad de Bohr y por sus concepciones físicas.³⁶⁵ Para Bohr el encuentro también fue muy satisfactorio y de gran enriquecimiento intelectual, como se refleja en una carta que le envió poco después de su visita: “Estoy aquí sentado y pensando acerca de todo lo que me has dicho sobre tal diversidad de cosas y, pensando en cualquiera de ellas, siento que he aprendido tanto de ti que será de gran importancia para mí; pero, al mismo tiempo, me resulta muy difícil expresar mi sentimiento de felicidad por tu amistad, y de gratitud por la confianza y la simpatía

³⁶³ Ehrenfest a Bohr, 10 de mayo de 1918, citada en Boeyink (2005, p. 30-31).

³⁶⁴ El nombre de su conferencia fue *Problems of the atom and the molecule*. También estuvo presente en esa ocasión en la defensa de la tesis doctoral de Kramers (Pais, 1991, p. 190).

³⁶⁵ Véase Luntheren (2003, p. 17-18).

que me has mostrado. Me encuentro completamente incapaz de encontrar palabras para ello”.³⁶⁶

A finales de 1920 Bohr se encontraba preparando su contribución en el Congreso Solvay que tendría lugar en 1921. No pudo asistir por exceso de trabajo³⁶⁷ y porque se encontraba un poco enfermo. Ehrenfest le ofreció su ayuda y presentó tanto la contribución de Bohr como la suya propia sobre el principio de correspondencia.³⁶⁸ El éxito de Ehrenfest en dicha conferencia se refleja en una carta de Lorentz (quien fungió como presidente del Congreso) a Bohr en la que le informa que “El profesor Ehrenfest hizo todo lo que estuvo a su alcance para salvar su ausencia y la exposición que nos ofreció sobre el principio de correspondencia tuvo un gran éxito. Todos los presente lo admiramos y estoy seguro de que si usted lo hubiera escuchado, le habría dado mucha satisfacción”.³⁶⁹

Ehrenfest visitó a Bohr por primera a vez en Copenhague en diciembre de 1921 y la experiencia fue tan rica como en la ocasión de su encuentro en Leiden. Lo que resultaba más atractivo para Ehrenfest respecto a Bohr era su “convicción de que nos encontramos tocando el inicio de una física esencialmente nueva”³⁷⁰ y su manera de trabajar y escribir que contrastaba con la de su otro gran amigo, Albert Einstein. En una conversación con Robert Oppenheimer, Ehrenfest comparó a sus dos amigos y marcó sus diferencias comparándolos con dos grandes pintores: “Einstein es como Holbein, en el que todo, dentro del marco, es luminosamente claro y armonioso. Con Bohr, es como con Rembrandt, hay una región intensa de luz, cuya intensidad es realzada por la oscuridad que la rodea”.³⁷¹ Sería interesante saber con qué pintor se identificaría él mismo siendo que su forma de escribir se caracterizó por el uso de

³⁶⁶ Bohr a Ehrenfest, 10 de mayo de 1919, citado en Klein (1981, p. 8)

³⁶⁷ En marzo de 1921 se iba a inaugurar su propio Instituto de Física Teórica en Copenhague y estuvo muy ocupado con los problemas organizacionales para el establecimiento del mismo.

³⁶⁸ La colaboración de Ehrenfest en el Congreso Solvay de 1921 se tituló *Le principe de correspondance, atomes et electrones*. Se encuentra también en Ehrenfest (1959, pp. 436-442) bajo el nombre de *Le principe de correspondance* y para esta tesis la hemos traducido al español en el apéndice 5.1.

³⁶⁹ Lorentz a Bohr, 20 de mayo de 1921, citada en Boeyink (2005, p. 33). Para mayor detalle sobre las vicisitudes ocurridas en relación con la participación de Bohr y la ayuda que le brindó Ehrenfest, se puede consultar a Klein (1981, pp. 8-9).

³⁷⁰ Ehrenfest a Lorentz, 4 de febrero de 1922, citado en Klein (1981, p. 10).

³⁷¹ Citado en Boeyink (2005, p. 37).

oraciones cortas pero certeras, resaltando o incluso caricaturizando alguna situación para capturar la esencia, los elementos definitorios de un tema o un concepto, en unos cuantos trazos.

De esta manera, Ehrenfest terminó apreciando en gran medida el trabajo de Bohr. En una carta a Lorentz se expresa de él diciendo que es “un científico natural muy completo”.³⁷² También terminó sintiéndose muy orgulloso por la incorporación que Bohr hizo de su hipótesis adiabática. En 1923 escribió un artículo titulado *Transformaciones adiabáticas en la teoría cuántica y el tratamiento que de ellas hace Niels Bohr*³⁷³, en el que dice lo siguiente:

Se presenta aquí, para su discusión (...) el “Principio Adiabático” que en manos de Bohr se ha convertido en un maravilloso y agudo instrumento, de lo que me siento asombrado de cómo se ha hecho; porque probablemente no hay, provisionalmente, según creo, discusión más profunda y al mismo tiempo más sucinta del Principio Adiabático, que la que ofrece el mismo Bohr, al mismo tiempo que busca con claridad las relaciones orgánicas entre el Principio Adiabático y el Principio de Correspondencia (...) puedo intentar mostrar (...) qué elementos esclarecedores y de profundización, y qué nuevas perspectivas le debemos a la intervención de Bohr.³⁷⁴

La colaboración Bohr-Ehrenfest estuvo encaminada primordialmente a esta búsqueda de conexiones entre las viejas teorías y las nuevas ideas cuánticas, pero precisamente en esos puntos de contacto surgían las paradojas. ¿Qué pasa cuando se rompe la conexión? Ya en su presentación sobre el Principio de Correspondencia en el Congreso Solvay de 1921, Ehrenfest expresaba que en el caso general “este puente de interpolación de movimientos intermedios, del que nos hemos servido, oponiendo a una cierta transición la radiación clásica correspondiente, no existe en absoluto. ¿Qué hacer entonces? ¿La idea fundamental de la «correspondencia» implica que en este caso la transición $M' \rightarrow M''$ se lleva a cabo por medio de una radiación

³⁷² Ehrenfest a Lorentz, 4 de febrero de 1922, citado en Boeyink (2005, p. 72).

³⁷³ Véase Ehrenfest (1959, pp. 463-470). En el apéndice 5.3 de esta tesis se ofrece una traducción al español de las primeras tres secciones.

³⁷⁴ Véase el apéndice 5.3 de esta tesis, pp. 286-287.

espontánea? Esto sería una nueva fuente de reglas que limitaría la selección de las vías por las cuales un átomo puede reconstituirse después de una perturbación”.³⁷⁵

Dicha forma de radiación rompería con el principio fundamental de causalidad y sería revelado de manera más contundente por algunos experimentos.

5.3 El experimento de Stern y Gerlach comentado por Einstein y Ehrenfest y la amenaza a la causalidad

El desarrollo de una ciencia se adhiere necesariamente a ciertos principios lógicos, y en la física, el principio de causalidad ha sido ciertamente uno de ellos. En su forma más simple, dicho principio se refiere a que todo efecto tiene una causa, un antecedente inmediato. El que un evento no tenga una causa que lo haga suceder sería el equivalente a algo “mágico” o “milagroso”. Casi por definición podríamos decir que la función de la física es conocer las causas de los fenómenos. Entonces, ¿podría la física renunciar al principio de causalidad? En la sección 1.3 de este escrito hicimos referencia a la tesis de Forman que nos habla de la existencia, en la república de Weimar, de un movimiento entre los físicos tendiente a evadir la causalidad en física, atribuyéndolo a influencias culturales externas. Pero también mencionamos que otros filósofos de la ciencia, como es el caso de John Hendry, consideran más bien la existencia de razones internas a la misma disciplina para dar cuenta del abandono de la causalidad estricta en física.

Los principios cuánticos desde luego pusieron en aprietos a los físicos. A pesar de que se hablara de radiación espontánea, sin causa aparente, en general se suponía que existía algún mecanismo causal desconocido en el proceso. Pero el tema ciertamente estaba en el aire. Por otro lado, *espontáneo* no tendría que ser sinónimo de *acausal*. Bohr prefirió definirlo como un proceso en el cual no se identifica una estimulación externa, pero dejando abierta la existencia de causas internas o todavía desconocidas.³⁷⁶

³⁷⁵ Véase el apéndice 5.1 de esta tesis, p. 279.

³⁷⁶ Véase Hendry (1980, p. 320, nota 49).

Einstein introdujo, en un par de artículos publicados en 1916 y 1917,³⁷⁷ la noción de que las transiciones entre estados en el átomo de Bohr están gobernadas por una serie de probabilidades, de manera análoga a como ocurría en los procesos radiactivos.³⁷⁸ Y nuevamente, aunque Einstein asumía la existencia de algún mecanismo causal detrás de dichas probabilidades, la ausencia explícita de dicho mecanismo resultaba muy provocativa.³⁷⁹ Algunos años después Einstein mostraba su perplejidad en una carta escrita a Max Born: “Ese asunto de la causalidad me sigue dando problemas (...) ¿Se podrán llegar a entender la emisión y absorción cuántica de luz en un sentido causal completo, o permanecerá un elemento estadístico? (...) Me haría muy infeliz renunciar a la causalidad completa”.³⁸⁰

En 1922 los físicos alemanes Otto Stern y Walter Gerlach llevaron a cabo un experimento sobre deflexión de partículas que ayudó a sentar las bases experimentales de la mecánica cuántica y que produjo diversas reacciones entre la comunidad científica.³⁸¹ Particularmente, Einstein y Ehrenfest escribieron un artículo

³⁷⁷ Una descripción más detallada de las ideas que desarrolló Einstein a este respecto se puede consultar por ejemplo en Pais (1991, pp. 190-192), en Whitaker (1996, pp. 120, 121) o en Mehra & Rechenberg (1982, vol. I, pp. 238-243). El artículo completo de Einstein de 1917, titulado *Zur Quantentheorie der Strahlung*, y traducido como *On the quantum theory of radiation*, se puede consultar en Waerden (1968, pp. 63-77).

³⁷⁸ La preocupación original de Einstein era obtener una demostración más clara de la ley de radiación de Planck. El 11 de agosto de 1916 había escrito a su amigo Michele Besso diciéndole: “he tenido un destello de lucidez a propósito de la absorción y la emisión de radiación (...) una demostración completamente sorprendente de la fórmula de Planck, yo incluso diría *la* demostración. Todo completamente cuántico” y refiriéndose al mismo trabajo continúa en otra carta el 24 de agosto diciendo: “se puede mostrar de forma convincente que los procesos elementales de la emisión y la absorción son procesos dirigidos” (Einstein, 1994, p. 129 y 131). Al decir “dirigidos” se refiere a que la radiación emitida no se da en forma de ondas esféricas, sino como paquetes de energía que se proyectan al azar en alguna dirección.

³⁷⁹ Aunque, al trabajar con probabilidades, se puede decir que se trataba de una teoría de carácter estadístico, la situación era muy diferente al caso, por ejemplo, de la mecánica estadística, donde las probabilidades se derivaban de un comportamiento causal de las partículas.

³⁸⁰ Carta de Einstein a Born, el 27 de enero de 1920, citada en Pais (1991, pp. 191-192).

³⁸¹ En el átomo de Bohr, no sólo la energía está cuantizada, sino también el momento angular del electrón. Uno de los números cuánticos empleado en la descripción cuántica de ese sistema determina la orientación de dicho momento angular y es a lo que se le llamó cuantización espacial. La energía, y por lo tanto, el espectro del átomo es independiente de ese número cuántico, por lo que el papel de dicha cuantización espacial resultaba inobservable a través de la espectrografía. El experimento de Stern-Gerlach fue diseñado para determinar si las partículas atómicas poseen en realidad dicho momento angular intrínseco. El experimento consistió en la deflexión de un haz de átomos de plata que atraviesan por un campo magnético no homogéneo. Si las partículas que atraviesan fueran *clásicas*, entonces la distribución de sus vectores de momento angular sería aleatoria dentro de un continuo y cada una de ellas sería deflexionada hacia arriba o hacia abajo en diferentes grados, produciendo una distribución continua en la pantalla de un

titulado *Quantentheoretische Bemerkungen zum Experiment von Stern und Gerlach* (Anotaciones teórico-cuánticas sobre el experimento de Stern y Gerlach)³⁸² que nos parece muy significativo porque muestra la perplejidad de la comunidad científica ante los resultados que arrojaba el experimento. Einstein y Ehrenfest empiezan su comentario en la sección 1 de su artículo diciendo:

O. Stern y W. Gerlach hicieron pasar un haz de átomos de plata a través de un campo magnético para determinar si los átomos poseían un momento magnético y, si ése era el caso, qué orientación exhibía durante su travesía por el campo magnético. Su experimento arrojó como resultado muy significativo el siguiente: el momento magnético de todos los átomos coincide, durante su paso por el campo, con la dirección de las líneas de fuerza, quedando aproximadamente la mitad de los átomos en el sentido del campo y en sentido contrario la otra mitad. Surge de manera natural la pregunta sobre de qué manera los átomos obtienen esta orientación.³⁸³

La pregunta que se hacen al final de este primer párrafo es una pregunta sobre la *causalidad* del proceso. Einstein y Ehrenfest, en su artículo, se esfuerzan por entender de qué manera los magnetos atómicos asumen una orientación definida, preestablecida, en el campo. En los párrafos siguientes Einstein y Ehrenfest discuten de manera crítica algunas implicaciones del experimento, sobre todo la amenaza al ideal de causalidad, sugiriendo posibles explicaciones a los resultados del experimento, pero sin llegar a un esclarecimiento aceptable del problema.

En una carta Einstein le comentaba a Born algunos aspectos sobre lo que había estudiado con Ehrenfest:

detector. En el experimento las partículas fueron deflexionadas hacia arriba o hacia abajo pero de manera discreta, dejando una marca de dos regiones puntuales en el detector, lo cual indicaba que el momento angular estaba cuantizado. Por supuesto, ésta es una descripción muy simplificada. Para una narración más extensa, detallada y con los elementos históricos pertinentes sobre el experimento, se puede consultar Friedrich & Herschbach (1998), Friedrich & Herschbach (2003) y Stenson (2005)

³⁸² Se puede consultar en Ehrenfest (1959, pp. 452.455). En el apéndice 5.2 de esta tesis se puede consultar la traducción al español bajo el título *Anotaciones teórico-cuánticas sobre el experimento de Stern y Gerlach*.

³⁸³ Véase el apéndice 5.2 de esta tesis, p. 281.

El logro más interesante en este momento es el experimento de Stern y Gerlach. La alineación de los átomos sin que haya colisiones vía intercambio de radiación no es comprensible de acuerdo con los métodos teóricos conocidos; tomaría más de 100 años para que los átomos se alinearan. He hecho algunos cálculos sobre esto con Ehrenfest.³⁸⁴

Dichos cálculos se comentan en la sección 3 del artículo. Para Einstein y Ehrenfest resulta un misterio el cómo ocurre la orientación magnética de los átomos considerando que éstos entran al campo con orientaciones aleatorias y con una densidad en el haz muy baja, tal que prácticamente no ocurren colisiones para intercambiar energía. En la sección 4 sugieren dos posibilidades para salir de la dificultad presentada por los resultados del experimento:

A. El mecanismo real consiste en que los átomos nunca pueden estar en un estado en el que no estén completamente cuantizados.

B. Se llega a los estados por medio de rápidos efectos, lo cual va contra las reglas cuánticas relativas a la orientación; las condiciones requeridas por las reglas cuánticas se producen por medio de la radiación absorbida y emitida, pero con una rapidez de reacción mucho mayor que con una transición de un estado cuántico a otro.³⁸⁵

Y aunque discuten brevemente las implicaciones de estas posibilidades, reconocen que al momento no es posible dar una explicación completa. Los rompecabezas que todo esto representaba no se aclararían sino hasta varios años después, con el desarrollo de la nueva mecánica cuántica y sobre todo, con la llamada interpretación de Copenhague, que incorporaría el principio de incertidumbre de Heisenberg y que sí representaría ahora un rompimiento más radical con la física clásica.

³⁸⁴ Carta de Einstein a Born, marzo de 1922, citada en Friedrich & Herschbach (2003, p. 57).

³⁸⁵ Véase el apéndice 5.2 de esta tesis, p. 282.

5.4 Conclusiones

Durante los primeros años del siglo XX se fue reconociendo poco a poco que el trabajo de Planck involucraba algo más que la derivación de una fórmula exitosa para la radiación del cuerpo negro. Se argumentó que al cuantizar la energía, se iba en contra de algunos aspectos de la teoría clásica. Se escribieron distintos artículos, entre ellos los de Paul Ehrenfest de 1905 y 1906, que trataban de asimilar y entender las nuevas ideas. La familiaridad que Ehrenfest tenía con la mecánica estadística en general, y con el trabajo de Boltzmann en particular, le permitieron alcanzar esta comprensión. La interpretación de la importancia del cuanto de acción h surgió del reconocimiento, por parte de Ehrenfest, de que la fórmula de Planck involucraba una desviación sutil del enfoque combinatorio que Boltzmann había aplicado a los gases.

Una vez reconocida la importancia del trabajo de Planck, hombres como Bohr y Ehrenfest, a pesar de verse convencidos de que las teorías clásicas fallaban, se propusieron sin embargo explotar al máximo las mismas como parte del proceso de desarrollo hacia las nuevas teorías. Bohr lo hizo por medio de su principio de correspondencia, en tanto que Ehrenfest hizo lo propio con su principio adiabático. La heurística detrás de ambos principios consistió en considerar que la mecánica Newtoniana seguía siendo válida en tanto un sistema permaneciera en un estado estacionario, mientras que la teoría cuántica daría cuenta de los saltos de un estado a otro. Con el principio adiabático en particular, si se conocían las reglas cuánticas de un sistema dado, entonces, aplicando teorías clásicas, se podían obtener las reglas correspondientes de otros sistemas. Lo que hemos querido resaltar con el ejemplo del trabajo de Bohr y Ehrenfest es que las teorías nuevas no se desarrollan desechando las viejas, sino por el contrario, trabajándolas de manera que permitan una asimilación de las nuevas.

Pero como decíamos, en una revolución del conocimiento, al final surgen en verdad nuevos paradigmas con los que finalmente las nuevas teorías se desprenden de las anteriores. Tal fue el caso con el reconocimiento de que si bien en el pasado se consideraron los fenómenos físicos macroscópicos como resultado estadístico de los

procesos microscópicos de cambio causal, ahora se reconocieron esos procesos como estadísticos en sí. Esa fue, al menos, la interpretación de algunos experimentos que serían fundamentales para la nueva física que vendría unos años después.

6 Epílogo: Génesis de la mecánica cuántica

En capítulos anteriores ha sido nuestra intención utilizar la vida y obra de Paul Ehrenfest para dar una mirada a los procesos que dieron lugar a cuestionar el conocimiento de las teorías físicas clásicas, especialmente la mecánica, la electrodinámica y la termodinámica, hasta llegar a los planteamientos de lo que más tarde se conoció como la vieja teoría cuántica (fundamentalmente la teoría atómica de Bohr). No es el objetivo de esta tesis continuar con un análisis de la vida y obra de Ehrenfest en el período subsiguiente en el que surgiría la nueva teoría cuántica (que identificamos principalmente con científicos como Born, Heisenberg, Schrödinger y Dirac). Sin embargo, sí queremos dejar en el presente capítulo, a manera de epílogo, una breve semblanza de la transición ocurrida en las ciencias físicas, que coincide con los últimos años de vida de Paul Ehrenfest, refiriéndonos sobre todo a la relación que sostuvo con físicos de la nueva generación.

Después de sus significativas contribuciones a la física de su tiempo por medio de su hipótesis adiabática, el trabajo de Ehrenfest se fue reduciendo a una serie de pequeñas contribuciones, muchas de ellas en colaboración con otros físicos. Sin embargo, Ehrenfest siguió teniendo un papel predominante en diferentes congresos internacionales, en los cuales se mantuvo al tanto de manera meticulosa de los desarrollos de su disciplina y continuó siendo un crítico agudo.³⁸⁶

El proceso de cambio hacia la nueva mecánica cuántica estuvo marcada por una elección, que ahora identificamos como la *formulación ortodoxa* o *interpretación de Copenhague*, con la cual se abandonó el ideal de dar una representación espacio-temporal continua a los fenómenos físicos a favor de limitar la tarea de la física a correlacionar hechos experimentales en términos de los registros que se pueden obtener de los instrumentos de medición.³⁸⁷ Sin embargo,

³⁸⁶ Véase Lunten (2003, p. 21).

³⁸⁷ Por supuesto hubo una larga lucha entre la interpretación realista que intenta hacerse una imagen de un mundo externo independiente del observador y la interpretación instrumental de Copenhague que fue al final la más ampliamente aceptada. La inseparabilidad entre sujeto y

algunos se esforzaron por conservar esa posibilidad de visualización espacio-temporal. En 1924, Luis de Broglie presentó la idea de que todo cuerpo en movimiento está acompañado de una onda. Sus ideas, junto con las de Einstein, inspiraron más tarde a Schrödinger a desarrollar su mecánica ondulatoria para la descripción de partículas materiales.

Pero regresando a los años posteriores a la Primera Guerra Mundial, Gotinga en Alemania, y Copenhague en Dinamarca, se habían venido convirtiendo en los principales centros de desarrollo de la nueva física.³⁸⁸ En junio de 1922, Bohr ofreció en Gotinga una serie de conferencias.³⁸⁹ En esa oportunidad Bohr conoció a dos jóvenes brillantes que tendrían un papel muy importante en los años siguientes: Wolfgang Pauli y Werner Heisenberg, discípulos de Sommerfeld.

El asunto que se ventilaba en aquellos años consistía en determinar hasta dónde la teoría de Bohr correspondía con los hechos y en encontrar sus limitaciones. La suposición de Bohr consistía en que un átomo sólo podía existir en estados estacionarios, los cuales se describían por medio de soluciones especiales de las ecuaciones de la mecánica clásica que eran seleccionadas por medio de ciertas reglas cuánticas. Todo esto funcionaba muy bien para sistemas con un solo electrón, pero la cuestión consistía en saber hasta qué punto se podía generalizar para sistemas con múltiples electrones. El trabajo de Born, Pauli y Heisenberg fue fundamental para dilucidar esas interrogantes.

En 1924 Pauli propuso la introducción de un cuarto número cuántico³⁹⁰ para poder dar cuenta del efecto Zeeman (la separación de líneas espectrales en presencia de campos magnéticos intensos) y en 1925 formuló su ahora famoso *principio de*

objeto de la observación se convirtió en el fundamento conceptual de la mecánica cuántica con lo cual el concepto de realidad objetiva perdió su sentido más obvio.

³⁸⁸ En toda Europa, pero particularmente en Alemania, se vivían tiempos difíciles, de gran inestabilidad sociopolítica y como ya lo hemos señalado existen argumentos para sustentar una fuerte influencia de dichos factores externos en el desarrollo de la física cuántica (ver tesis de Forman en la sección 1.4 de este trabajo).

³⁸⁹ Véase Waerden (1968, p. 21).

³⁹⁰ Recordemos que los otros tres son: el número cuántico principal n que está relacionado con la energía del electrón y el tamaño de la órbita, el primer número cuántico orbital l asociado a la forma de la órbita (elíptica en general) y el segundo número cuántico orbital m relacionado con la orientación de la órbita o momento angular.

exclusión que señalaba que dos electrones en un mismo átomo no pueden encontrarse en la misma situación, es decir, no pueden poseer los mismos números cuánticos. Ehrenfest sospechó de inmediato que tendría que existir una relación entre el *principio de exclusión* y la impenetrabilidad de la materia.³⁹¹ Pero de mayor éxito fue la interpretación que dos discípulos de Ehrenfest, Goudsmith y Uhlenbeck, hicieran del cuarto número cuántico al asociarlo con la rotación del electrón sobre su propio eje (a lo que se le llamaría *spin* del electrón).³⁹²

Paul Ehrenfest estableció fuertes lazos de amistad con Pauli. Se conocieron por primera vez durante las conferencias de Bohr en Gotinga a las que nos referimos previamente. Ahí se inició una “guerra de bromas” entre estos caballeros, pues en dicha reunión Ehrenfest le habría dicho a Pauli: “Señor Pauli, su artículo en la Enciclopedia me place mucho más que usted mismo”. Pauli le habría contestado diciendo: “es curioso, con respecto a usted, a mí me sucede justo lo contrario”.³⁹³ En una obra de teatro amateur, que fue escrita en 1932 por el joven físico Max Delbrück a manera de sátira del Fausto de Goethe, para ser representada por otros colegas suyos, los personajes de Fausto y Mefistófeles eran sustituidos ahora por Ehrenfest y Pauli. En esta versión del famoso drama, el tema central es el intento de Pauli para persuadir al escéptico Ehrenfest de la existencia del neutrino.³⁹⁴ Ehrenfest llegó a considerar a Pauli como un buen amigo y “físico brillante y artístico”.³⁹⁵

A mediados de los años 20's, el trabajo que se encontraba realizando Ehrenfest tenía que ver fundamentalmente con cuestiones de estadística aplicada a problemas de la teoría cuántica. En este contexto, Ehrenfest estudió también los nuevos métodos de estadística cuántica, introducidos por Bose y Einstein. Un aspecto que resultó fundamental en la nueva estadística fue el hecho de que las partículas

³⁹¹ En 1927 escribió un artículo muy breve titulado *Relation between Reciprocal Impenetrability of Matter and Pauli's Exclusion Principle*. Se puede consultar en Ehrenfest (1959, p. 546).

³⁹² Goudsmith dio cuenta de algunos detalles interesantes sobre la historia de este descubrimiento en una conferencia ofrecida en 1971 con motivo del jubileo de oro de la Sociedad Física Holandesa, que se encuentra transcrita en <http://www.lorentz.leidenuniv.nl/history/spin/goudsmit.html>

³⁹³ Véase Boeyink (2005, p. 35). Los artículos a los que se refieren son los que respectivamente escribieron en la *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften*, Ehrenfest sobre mecánica estadística, y Pauli sobre la teoría de la relatividad.

³⁹⁴ Véase Gamow (1985, p. 165).

³⁹⁵ Carta de Ehrenfest a Landé, el 7 de diciembre de 1924, citada en Boeyink (2005, p. 36).

perdieron su individualidad, de manera que en este orden de ideas la permutación de partículas no da como resultado una situación física distinta.³⁹⁶ Fue precisamente Ehrenfest, en su continua búsqueda de significados, quien introdujo esta interpretación física.³⁹⁷ En el verano de 1925 Ehrenfest ofreció una serie de conferencias en Gotinga sobre la estadística de Bose-Einstein. Entre los participantes se encontraban Born y sus ayudantes Heisenberg y Jordan.³⁹⁸

Poco después Heisenberg visitó Leiden por invitación de Ehrenfest. Ahí discutió con el propio Ehrenfest y con Goudsmith una serie de ideas radicales que se convertirían en los fundamentos de la mecánica matricial. Ehrenfest se quedó profundamente impresionado por las innovaciones teóricas de Heisenberg, al grado de compararlo con Isaac Newton, pues no sólo había desarrollado una nueva mecánica, sino también las matemáticas asociadas a esos desarrollos. Sin embargo, con esta nueva conceptualización resultaría muy difícil inferir resultados concretos y más aún crearse una imagen gráfica de los procesos descritos por la teoría de Heisenberg.³⁹⁹

Heisenberg se benefició de dos tradiciones científicas diferentes, propias de quienes en diferentes momentos fueron sus mentores, Born que representaba el formalismo matemático de la escuela de Gotinga y Bohr en Copenhague que representaba el enfoque físico filosófico.⁴⁰⁰ Respecto a Bohr y en relación con su encuentro en Gotinga en 1922, Heisenberg escribió:

Habló suave y con ciertos titubeos, pero detrás de cada palabra cuidadosamente escogida uno podía discernir una larga cadena de pensamiento, que finalmente se transformaba en el trasfondo en un punto de vista filosófico que me fascinaba (...) comprendí que era posible para él sentir las relaciones intuitivamente, más

³⁹⁶ Además, las partículas indistinguibles se clasifican como fermiones o bosones, siendo los primeros los que no pueden compartir estados cuánticos (de acuerdo con el principio de exclusión de Pauli), y los segundos los que sí pueden hacerlo. Esta distinción da por resultado diferentes formas de distribución estadística.

³⁹⁷ La preeminencia de Ehrenfest en esta interpretación y su importancia es mostrada por Pauli en un obituario con motivo de la muerte de Ehrenfest publicado en *Die Naturwissenschaften* 21, p. 841. Se puede consultar en Pauli (1994, p. 83-84).

³⁹⁸ Véase Luntheren (2003, p. 23).

³⁹⁹ Véase Mehra & Rechenberg (1982, vol. IV, pp. 232-233).

⁴⁰⁰ Véase Sánchez Ron (2001, p. 425).

que derivarlas formalmente (...) entendí que el conocimiento de la naturaleza se obtiene primordialmente de esta manera, y sólo como paso posterior uno puede tener éxito en ajustar el conocimiento en forma matemática y sujetarlo entonces a un análisis racional completo. Bohr era primordialmente un filósofo, no un físico, pero entendía que la filosofía natural en nuestro tiempo tiene validez sólo si todos sus detalles pueden ser sujetos a la inexorable prueba del experimento.⁴⁰¹

Con su mecánica de matrices y su enfoque filosófico, adquirido en parte por la influencia de Bohr, consistente en basar la teoría solamente en magnitudes observables, Heisenberg unió dos estilos y logró una nueva forma de hacer física.

Otro físico admirado por Ehrenfest fue Paul Dirac quien en los años 20's se erigía como uno de los físicos teóricos más prominentes y quien también fue huésped de Ehrenfest en Leiden en 1928. En ese mismo año Dirac desarrollaba la teoría cuántica relativista del electrón. Mientras tanto, en Gotinga, von Neumann trabajaba en la axiomatización de la mecánica cuántica, cuyo “ilegible y complicado aparato formal” provocaba en Ehrenfest un sentimiento combinado de repugnancia y respeto.⁴⁰²

En tanto que muchos físicos mayores ignoraron los nuevos desarrollos tanto como les fue posible, a Ehrenfest lo llenaron de desesperación. En 1928, le confesaba a Kramers haber perdido por completo el rumbo⁴⁰³ y se quejaba con su amigo Joffe respecto a la “peste matemática en la que está hundida toda la literatura de la física teórica”.⁴⁰⁴ Acosaba a otros físicos, sobre todo a Kramers y a Pauli pidiendo que le clarificaran lo que él no llegaba a comprender. En una ocasión lo hizo abiertamente publicando un artículo titulado *Einige die Quantenmechanik betreffende Erkundigungsfragen* (Algunas preguntas concernientes a la mecánica cuántica).⁴⁰⁵ Las reacciones favorables en torno a su artículo por parte de Schrödinger y de Pauli le dieron mucha satisfacción.

⁴⁰¹ Citado en Waerden (1968, pp. 21-22).

⁴⁰² Carta de Ehrenfest a Kramers, el 29 de agosto de 1928, citado en Lunteren (2003, p. 24).

⁴⁰³ Carta de Ehrenfest a Kramers, el 28 de agosto de 1928, citado en Lunteren (2003, p. 31).

⁴⁰⁴ Carta de Ehrenfest a Joffe, el 3 de noviembre de 1932, citado en Lunteren (2003, p. 31).

⁴⁰⁵ Se publicó en 1932 en el *Zeitschrift für Physik*, 78, pp. 555-559. Se puede consultar en Ehrenfest (1959, pp. 623-627).

Antes de que llegara la física cuántica, las magnitudes usadas en física correspondían de una manera directa a algún tipo de imagen del mundo y resultó muy impactante para algunos que en la teoría cuántica las cosas ya no fueran así. Lo que ofreció la nueva teoría cuántica fue un formalismo matemático simple y puro para el cálculo de las probabilidades relacionadas con las mediciones que se pueden hacer sobre un sistema cuántico. El formalismo cuántico consiste en el uso de varios símbolos matemáticos que no tienen relación obvia con alguna imagen intuitiva de la realidad. Dentro de esta dinámica el papel de la teoría científica ya no sería el de dar representaciones generales del mundo. El nuevo formalismo matemático y su flexibilidad permitieron que se aplicara a diferentes áreas especializadas en temas como física de materiales, física nuclear, astrofísica, cosmología, electrónica que dejaron ver todo su potencial y constituyeron un progreso tecnológico nunca visto antes.

Conclusiones

El progreso científico, particularmente dentro de la física, se ha visto de vez en cuando ensombrecido cuando el conocimiento ya no puede avanzar más dentro de los paradigmas de entendimiento asimilados o aceptados en un momento dado de la historia, como ocurrió con la época de crisis, no sólo científica sino también en otros aspectos culturales, que aconteció en los inicios del siglo XX. Paul Ehrenfest fue el físico por excelencia que discutió apasionadamente con sus colegas y discípulos, los problemas que surgían en su ciencia. El presente trabajo ha desarrollado y analizado, en diferentes capítulos, parte de la obra de Ehrenfest, en términos de los temas cruciales que se encontraban en el aire y de las tensiones e inconsistencias que iban surgiendo en el camino. Cada uno de esos capítulos centrales de esta tesis cuenta con su propia sección de conclusiones, a las cuales puede dirigirse el lector en relación a los temas específicos ahí tratados, de manera que aquí sólo señalaremos algunas ideas generales que nos parece importante resaltar y mencionaremos las oportunidades de investigación futura.

1. Paul Ehrenfest fue un hombre con grandes cualidades, pero cuya personalidad, caracterizada por un fuerte y cada vez más asentado sentido de inferioridad que empañó su espíritu en sus últimos años, lo llevó a un final trágico que mucho tuvo que ver con su sentimiento de incapacidad para seguirle el paso a la revolución que sufría su ciencia, la física. Sin embargo, sus contemporáneos coinciden, en general, en describirlo como un hombre de aguda inteligencia y gran talento, que gustaba particularmente de intervenir en discusiones con mordaz criticismo, pero al mismo tiempo con profunda visión sobre lo que representa una verdadera actitud científica, dirigiendo siempre su atención a algún punto esencial, a alguna paradoja o algún punto oscuro, que otros pasaban por alto o consideraban de manera insuficiente. Científicos como él, con ese tipo de actitud crítica, quienes no necesariamente son reconocidos por alguna contribución muy brillante, fueron de todas maneras fundamentales para superar

los obstáculos que se cernían sobre la física, y sirven de ejemplo de que la crítica científica objetiva y positiva, dirigida a discernir la esencia de las ideas, por más dura que sea, por lo general tiene un efecto estimulante para el avance de la ciencia.

2. Si bien Hendrik Lorentz y Kamerlingh Onnes le habían otorgado a la Universidad de Leiden fama internacional en el campo de la física, Ehrenfest fue quien aseguró la continuación de dicha reputación científica. Como parte de esta tarea Ehrenfest logró que muchos científicos extranjeros visitaran o tuvieran algún tipo de estancia académica en Leiden y que de sus aulas surgieran físicos brillantes, a quienes impulsó a través de un contacto muy personal, y que tendrían una reconocida carrera científica en diversos campos.
3. El espíritu crítico de Paul Ehrenfest se dejó ver especialmente en lo concerniente a la mecánica estadística y respecto al significado de los conceptos cuánticos iniciados por Planck. Los trabajos por los que obtuvo mayor reconocimiento fueron su artículo en la *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften*, que para muchos representa aún una referencia invaluable para todo aquél interesado en la mecánica estadística, y su *principio adiabático*, que constituyó, junto con el *principio de correspondencia* de Bohr, una guía fundamental en el surgimiento de la nueva física.
4. El trabajo de Paul Ehrenfest nos ha servido para ilustrar la importancia de las dimensiones científicas que van más allá de sus aspectos lógico-formal y experimental, las facetas donde la imaginación científica juega un papel especial, a través del uso de experimentos mentales y de modelos simples que resalten lo esencial de un concepto, así como el uso de analogías y metáforas, etc. Sin embargo, al mismo tiempo, lo que hemos analizado nos muestra que si bien muchos de los grandes físicos de la época estudiada recurrieron al uso de todos esos juegos mentales, siempre estuvieron plenamente conscientes de que el éxito

de la ciencia moderna se debe finalmente a que todo elemento conjeturado sea sujeto finalmente a la prueba inexorable del experimento. El éxito alcanzado finalmente por la física en estos tiempos de lucha conceptual, probablemente dependió de la existencia de un balance entre la actitud conservadora de algunos científicos y el carácter más abierto y propositivo de otros, y entre la imaginación y creatividad de ciertos físicos y el carácter escéptico y crítico de otros.

5. Desde la perspectiva de los trabajos de Paul Ehrenfest, vista en relación con la obra de otros contemporáneos, le hemos dado una mirada a una serie de patrones de razonamiento involucrados en la formación y desarrollo de ideas teóricas nuevas, a partir de ciertos elementos y aspectos de teorías anteriores que se encontraban firmemente establecidas. Hombres como Ehrenfest y Bohr, aun estando convencidos de las fallas de las teorías físicas clásicas, se esforzaron por seguir aprovechando al máximo todas sus bondades y riquezas durante el proceso de generación de las nuevas teorías exigidas por la necesidad de explicar nuevos fenómenos y experimentos. Creemos que se necesitan mejores herramientas conceptuales para caracterizar esta continuidad entre teorías, estos procesos de cambio en donde prevalece en buena medida el uso de herramientas heurísticas, lo cual puede ser material de investigación futura.

6. El papel que tuvo Paul Ehrenfest en el surgimiento de la nueva física cuántica a mediados de los años 20's solamente fue esbozado en esta tesis refiriéndonos brevemente a su relación con científicos como Born, Pauli y Heisenberg, de manera que dejamos para el futuro la posibilidad de profundizar en este tema.

Apéndices

Gran parte de las fuentes primarias relacionadas con los orígenes de la física moderna se encuentran en alemán. La obra de Paul Ehrenfest no es la excepción. La mayor parte de sus escritos se encuentran en alemán, y solamente algunos en inglés y otros pocos en francés, holandés o ruso. Consideramos que para algunas personas interesadas en estos temas, este hecho puede representar una importante barrera para acceder a esta información. Como contribución de esta tesis presentamos en estos apéndices la traducción de algunos de los escritos de Ehrenfest directamente del alemán al español y uno más del francés al español. Esperamos que esta aportación sea bien recibida y de utilidad para quienes deseen conocer las aportaciones de Paul Ehrenfest a partir de su obra original pero traducida a nuestro idioma.

La numeración de los apéndices sigue el siguiente código: A X.Y, donde X es el número de capítulo de esta tesis donde se hace referencia a ese artículo, e Y es una numeración creciente. Así por ejemplo, los apéndices A 3.1, A 3.2 y A 3.3 son las traducciones de tres artículos de Ehrenfest usados en el capítulo 3.

A 2.1 Sobre la crisis en torno a la hipótesis del éter lumínico⁴⁰⁶

Permítanme hablarles sobre una crisis que actualmente amenaza seriamente una de las hipótesis fundamentales de la física - la hipótesis del éter. Me parece que esta crisis nos da una imagen vívida del característico ambiente revolucionario que domina de momento a la física teórica.

Para poder hablar con claridad, quiero proceder con un experimento ficticio, al que llamaremos de aquí en adelante y por brevedad “Experimento de la esfera”. Hemos seleccionado este experimento, de tal manera que nos lleve un paso adelante tan agudamente como se pueda.

Ustedes perdonaran, si por esa misma razón nuestra construcción fantástica se derrumba.

Supongamos que tenemos una enorme esfera vacía ante nosotros. Mucho más grande que la Tierra, mucho más grande que la órbita de la Tierra. Tan grande, que un rayo de luz necesitaría cerca de dos horas para atravesarla. Exactamente en el centro de la esfera se encuentra un experimentador. La esfera se encuentra en reposo ante nosotros. El experimentador hace el siguiente experimento: permite que una lámpara muy brillante se encienda por un instante, y espera para ver que pasa. Primero él ve por un instante la lámpara. Después permanece oscuro por dos horas. Esto es porque la luz viaja durante una hora desde el centro hasta la pared interna de la esfera hueca, y después de reflejarse, necesita otra hora para regresar a donde está el experimentador. Enseguida el experimentador ve iluminarse simultáneamente la pared interna de la esfera por un momento. Luego, todo queda oscuro de nuevo.

Ahora supongamos que se nos da una segunda esfera, idéntica a la primera. Y otra vez, justo en el centro de la esfera, tenemos un experimentador. Pero esta segunda esfera no está en reposo, sino que se mueve a una enorme velocidad, por

⁴⁰⁶ Transcripción de la conferencia inaugural dictada por Paul Ehrenfest el 4 de diciembre de 1912 con motivo de su nuevo puesto como profesor de física teórica en Leiden, reproducida en Ehrenfest (1959, pp. 306-327). El título original es *Zur Krise der Lichtaether-Hypothese*.

ejemplo a la décima parte de la velocidad de la luz. El experimentador viaja con ella. El experimentador debe ahora también, exactamente del mismo modo que el primero, dejar encendida por un instante una lámpara brillante, e igualmente, observar que pasa. Preguntamos: ¿ve el experimentador en la esfera en movimiento también alumbrarse toda la superficie interna en el mismo instante o ve otra cosa? Los físicos de diferentes épocas habrían respondido de formas variadas a esta pregunta.

Basándose en su teoría de la emisión de la luz, Newton diría: el experimentador de la esfera en movimiento debe ver exactamente lo mismo que el experimentador de la esfera en reposo. Esto es porque el envío de la luz desde la lámpara y la reflexión en la pared interna de la esfera hueca es un proceso mecánico puro, a la manera de los juegos de pelota: La lámpara arroja los corpúsculos de luz por el espacio vacío hacia la pared, y de la pared rebotan elásticamente de nuevo hacia la lámpara. Sin embargo, el progreso de semejante juego de pelota permanece naturalmente igual, indiferentemente de si tiene lugar en un cuarto en reposo con respecto a nosotros o en movimiento uniforme con respecto a nosotros.

Fresnel –uno de los fundadores de la teoría moderna de la luz- diría: ¡No, el experimentador de la esfera en movimiento ve algo completamente diferente a lo que ve el que está en la esfera en reposo! El ve lo siguiente: En primer lugar ve la lámpara, luego estará oscuro por aproximadamente dos horas, pero luego verá primero iluminarse el ecuador de la esfera (así llamado el círculo más grande de la esfera perpendicular a la dirección de movimiento de la esfera), posteriormente se iluminarán dos círculos de latitud simétricos al ecuador. Estos círculos se moverán simétricamente hacia los polos. Finalmente se iluminarán simultáneamente los polos de la esfera y luego quedará oscuro de nuevo.

¿Por que llega Fresnel a estas extrañas afirmaciones?

Fresnel tenía las siguientes hipótesis sobre la naturaleza de la propagación de la luz: Todo el espacio está lleno de un éter que se encuentra en reposo con respecto a las estrellas fijas. Los cuerpos se mueven libremente a través del éter sin arrastrarlo

consigo. Cuando una lámpara emite luz, eso significa que se produce una perturbación en el éter que la rodea; esta perturbación se propaga entonces por el éter en todas direcciones; algo así como cuando se propaga un golpe sobre una barra elástica.

Supongamos que la esfera hueca permanece fija junto con el experimentador con respecto al éter. El encendido de la luz forma una onda esférica que viaja simétricamente en todas direcciones desde el centro de la esfera; en un cierto momento, encuentra la pared interna de la esfera hueca y regresa toda junta de nuevo simétricamente hacia el punto medio de la esfera hueca.

Se tiene una situación completamente diferente con la segunda esfera, la cual, junto con su experimentador, viaja a enorme velocidad a través del éter rígido. El experimentador se encuentra aquí en una situación parecida a estar parado en un puente, debajo del cual fluye de manera uniforme una corriente intensa; exactamente así fluye su esfera-laboratorio en veloz marcha a través del éter rígido. ¿Pero qué sucede cuando uno deja caer al río una piedra desde el puente? Se propagan ondas circulares sobre la superficie del agua, las cuales son arrastradas por el mismo río. De la misma manera, los rayos de luz de la lámpara se propagan como ondas circulares y de la misma manera estas ondas circulares son arrastradas por el viento del éter que sopla a través de la esfera-laboratorio. Por lo tanto, aquí la propagación y la reflexión de las ondas de luz ya no transcurren tan simétricamente desde el centro de la esfera hueca. Pero basta un cálculo elemental para establecer también aquí firmemente, qué partes de la onda de luz regresan al experimentador primero y cuáles después. Y uno encuentra el resultado que hemos formulado arriba. Es decir, que el experimentador en la esfera en movimiento primero ve iluminarse el ecuador, luego los círculos de latitud y hasta el final ambos polos. Ese es, por lo tanto, el pronóstico que uno haría basándose en la hipótesis Fresneleana de un éter rígido.

Stokes supone que los cuerpos que se encuentran en el éter lumínico, lo arrastran con su movimiento. Pero si la esfera-laboratorio en movimiento se lleva consigo al éter, entonces queda claro sin más, que el experimentador en la esfera

móvil debe observar exactamente lo mismo que el experimentador en la esfera en reposo.

Recapitulando vemos entonces que:

La teoría de emisión de Newton y la teoría de Stokes del éter que se arrastra con el movimiento concuerdan en decir: El experimentador en la esfera en movimiento observa exactamente lo mismo que el experimentador en la esfera en reposo.

Por lo contrario, la teoría de Fresnel del éter rígido afirma: No, el experimentador ve una escena completamente distinta.

¿En cual de los pronósticos hemos de creer?

¿Porque entonces cómo tratamos la credibilidad de estas tres diferentes teorías de la luz?

En lo que primero concierne a la teoría Newtoniana de la Emisión, lo que sigue es de todos conocido: Durante el siglo XVIII prevaleció absolutamente. En los inicios del siglo XIX fue repentina y totalmente desplazada por la teoría del éter. Son muy conocidas las razones de peso por las cuales los físicos dieron lugar a este abandono repentino y radical de la teoría de la emisión. No podemos discutir esas razones en este espacio.

Por otro lado, la teoría del éter ganó gradualmente una posición de dominio casi total al interior de toda la física. Especialmente desde los trabajos de Maxwell y Hertz que habían mostrado una evidencia total de que los fenómenos ópticos no eran otra cosa que un caso especial de los fenómenos electromagnéticos: que las ondas de luz no eran otra cosa que ondas eléctricas más cortas. Porque entonces el éter lumínico se había convertido al mismo tiempo en el portador de todos los fenómenos electromagnéticos.

Dentro de la teoría del éter residen casi hasta el final del siglo XIX dos visiones concurrentes coexistiendo una junto a la otra. ¿Permanece el éter rígido o

cada cuerpo arrastra el éter que se encuentra con él? Queremos utilizar de aquí en adelante los siguientes nombres para estas dos teorías concurrentes. Teoría del éter rígido, teoría del éter móvil.

Debemos relatar la batalla entre estas dos teorías y la victoria final de la teoría del éter rígido al menos con algunas palabras puntuales.

La hipótesis del éter móvil sería representada por Stokes, especialmente en el área de los fenómenos ópticos. Así es que Stokes suponía también que la Tierra arrastraba con su movimiento el éter al moverse alrededor del Sol, de la misma forma como llevaba consigo su atmósfera. En el año de 1890, Hertz transfirió la hipótesis del éter móvil de la óptica a la teoría de la totalidad de los fenómenos electromagnéticos.

La hipótesis del éter rígido sería representada por Fresnel, especialmente en las áreas de los fenómenos ópticos. De ella se seguía entonces que la Tierra atravesaba el éter rígido en su carrera alrededor del Sol. Lorentz transfirió –también en los 90's- la hipótesis del éter rígido de los fenómenos ópticos a todos los fenómenos electromagnéticos.

¿Cuál fue el momento decisivo para la victoria que la teoría de Fresnel-Lorentz del éter rígido obtuvo sobre la teoría de Stokes-Hertz del éter móvil?

1. Lorentz demostró que: Las mediciones de aberración de la luz estelar realizadas por los astrónomos, no están en armonía con la suposición de Stokes de que la Tierra lleva consigo su cubierta de éter. Por el contrario, se explican correcta y cuantitativamente si uno supone, como Fresnel, que la Tierra se desliza por el éter rígido.

2. Fizeau había establecido experimentalmente con firmeza que la velocidad de la luz es mayor en agua fluyendo que en agua en reposo; y el aumento era una fracción de la velocidad de la corriente de agua. Es un éxito extremadamente significativo de la teoría de Lorentz, que pudiera explicar este resultado experimental

cuantitativamente correcto de manera transparente. Por el contrario, la hipótesis del éter móvil está en clara contradicción con lo que Fizeau encontró; ya que requeriría que la velocidad de la luz en el agua fluyendo aumentara por la cantidad total del flujo de agua.

3. En un momento, donde por cierto la victoria de la teoría Lorentziana había sido decidida ya por sus otros múltiples éxitos, otro experimento de físicos rusos trajo consigo una bonita y extraña confirmación. Dejemos rotar muy rápido un cuerpo electrificado que afecte a una aguja magnética como a un imán. Los físicos escogieron un arreglo especial que requería una fuerza magnética más grande con la teoría Lorentziana que con la Hertziana. También aquí otra vez el experimento decidió claramente en favor del éter rígido y en contra del éter móvil.

Volvamos de nuevo a nuestro experimento de la esfera y recordemos las predicciones que establecían las tres teorías de la luz. La teoría Newtoniana de emisión y la teoría de Stokes-Hertziana del éter móvil habían coincidido en decir: El experimentador de la esfera en movimiento ve exactamente lo mismo que el experimentador de la esfera en reposo. ¿Pero aún podemos creer gratuitamente el pronóstico de estas dos teorías, después de que los físicos han renunciado a ambas? – Parece que no - ¿Pero que decía la triunfante hipótesis del éter rígido? Exigía, como lo hemos visto antes, que el experimentador en la esfera móvil – debido al viento del éter que fluye por la esfera - vería algo totalmente diferente que el experimentador de la esfera en reposo. Y tan es así, que debemos quedarnos en suspenso.

Nuestro experimento de la esfera por lo visto no es diferente de una grotesca exageración de algunos experimentos reales llevados a cabo: los famosos intentos de Michelson.

Michelson trabaja con un aparato de solo unos cuantos metros de extensión y su aparato corre no con una décima sino con una diezmilésima de la velocidad de la luz por el éter; es decir, junto con nuestra Tierra que justo con esta velocidad gira en torno al Sol.

Por esta tan desfavorable relación, naturalmente Michelson tuvo que usar también formas de medición mucho más sensibles que las que usamos nosotros en el experimento de la esfera. Pero el principio es exactamente el mismo.

Podemos decir, por comodidad al hablar, que Michelson ha ejecutado directamente nuestro experimento de la esfera. ¿Y que encontró? ¿Encontró en realidad que los polos se iluminan después que el ecuador como lo requiere la hipótesis del éter rígido? Su arreglo era por mucho suficientemente sensible para constatar el retraso calculado, en caso de que existiera.

Ustedes saben que Michelson no pudo encontrar ninguna pista de este retraso esperado. Y es conocido que se han puesto en marcha otros experimentos, en parte eléctricos, en parte ópticos, para constatar el viento del éter, que debe prevalecer en nuestros laboratorios si es que en realidad nuestra Tierra se mueve a través de un éter rígido. – Ustedes saben que todos estos experimentos del viento del éter repetidamente han generado resultados negativos. Una y otra vez no se ha podido descubrir ninguna pista del viento del éter. Y eso es con una velocidad que es 1000 veces mayor que nuestros trenes D por nuestro laboratorio.

¿Cómo reaccionaron los físicos a este resultado siempre negativo de todos los experimentos sobre el viento del éter?

Quiero intentar confrontar entre sí los puntos de vista más importantes. Pero disculpen si tengo que repetir algunos muy conocidos.

Discutamos antes que nada el punto de vista de Lorentz en su trabajo de 1904 sin poder desgraciadamente entrar en el desarrollo gradual de este punto de vista.

La hipótesis del éter rígido, así como también la otra hipótesis básica de la vieja Teoría de Lorentz se mantienen en este trabajo de 1904. Por lo tanto no se pierden ninguno de los éxitos que habían ayudado para la victoria de la vieja teoría de Lorentz sobre las otras teorías competidoras.

Resulta novedosa la utilización de estas dos hipótesis formales simples en el trabajo de 1904. Tenemos que, debido a su movimiento por el éter

1. las fuerzas entre las moléculas y
2. la forma geométrica de los electrones cambian.

Extrañamente estas dos hipótesis eliminan total y absolutamente la contradicción que había existido entre la hipótesis del éter rígido y los resultados consistentemente negativos de todos los experimentos del viento del éter. Esta contradicción desaparece ahora totalmente. Porque partiendo de esas bases se deduce del trabajo de 1904, para una clase comprensiva de experimentos, la siguiente afirmación: Supongamos un laboratorio que viaja por el éter con una velocidad tan grande como se quiera (solo no mayor que la luz misma). Si entonces un experimentador en este laboratorio lleva a cabo un experimento, entonces observa exactamente el mismo desarrollo del experimento que lo que observaría si su laboratorio se mantuviera en reposo con respecto al éter. Permítanme expresar esta sentencia en forma abreviada como “Teorema de 1904”.

Es recomendable pensar en el uso de este Teorema en su aplicación a casos muy especiales. Uno estima entonces en una imagen coherente porqué es que gracias a esa hipótesis, el viento del éter consigue esconderse del experimentador.

Permítanme, en unos cuantos trazos, dar una imagen esquemática, que resulta en lo siguiente: El viento del éter distorsiona el desarrollo del proceso con el que opera el experimentador; además el mismo viento del éter estropea – si se nos permite la expresión – los instrumentos de medición de los experimentadores: deforma las reglas, cambia el curso de los relojes, etc. De todo eso se ocupan esas hipótesis básicas, especialmente la hipótesis que dice que el movimiento por el éter cambia las fuerzas de atracción entre las moléculas. Y si ahora el experimentador observa con sus instrumentos -que el viento del éter ha estropeado- el proceso distorsionado por el mismo viento del éter, entonces verá exactamente lo mismo que vería el observador en reposo con el proceso no distorsionado y los instrumentos no estropeados.

Es asombroso que, para una clase muy comprensiva de experimentos, estos resultados se puedan demostrar estrictamente a partir de unas pocas suposiciones básicas. Es maravilloso que en realidad se haya conseguido lograr una cadena completa sin defectos. Sería inmodesto de mi parte si quisiera describir con algún epíteto el método especial con el que el Sr. Lorentz ha llevado a cabo esta labor.

Especialmente con nuestro experimento de la esfera puede uno hacerse fácilmente plausible el contenido del Teorema de 1904. Bajo la base de la hipótesis del éter rígido, hemos esperado que el experimentador de la esfera en movimiento vea iluminarse los polos de la esfera después que el ecuador; debido a que viento del éter sopla la onda de luz que ha enviado la lámpara. Pero bajo la base de la hipótesis de que el viento del éter distorsiona las fuerzas moleculares, calculamos que el viento del éter ha deformado la enorme esfera, - y aunque la volteemos siempre estará aplastada en la dirección del movimiento: los polos quedan ahora más cerca del centro que el ecuador, en cantidad tal que el experimentador ahora sí ve iluminarse los polos exactamente al mismo tiempo que el ecuador. Exactamente como era el caso del experimentador de la esfera en reposo.

Las hipótesis básicas del trabajo de 1904 dan cuenta de que con todos los otros experimentos del viento del éter siempre permanezcan ocultos los efectos del viento del éter para el experimentador.

Pueden ver que: el trabajo de 1904 de Lorentz muestra algunas salidas posibles a la crisis, en la cual había caído la hipótesis del éter.

Pero no todos los físicos creyeron poder quedar contentos con esta solución de la crisis.

Llegamos entonces aquí a los dos puntos de vista que publicaron Einstein en el año 1905 y Ritz en el año 1908. Desgraciadamente no podemos, en el marco de esta plática, intentar una discusión de estos puntos de vista. Nos contentaremos con enfatizar las tendencias que marcan su posición en lo que respecta a la crisis del éter.

Los resultados negativos de todos los experimentos del viento del éter llevaron a ambos autores a la convicción de que en realidad no existe el éter. El espacio entre los cuerpos está vacío. Los electrones de los cuerpos interactúan a través de este espacio vacío por medio de los impulsos electromagnéticos y de la luz. En resumen, ambos autores enfatizan que en contraste con la teoría del éter de Lorentz, sus teorías empiezan otra vez con la teoría de emisión de Newton. A pesar de esta similitud permanece un contraste más profundo entre los puntos de vista de Einstein y de Ritz. Lo podemos reconocer mejor bajo la base de las siguientes preguntas:

Tomemos una fuente de luz A en reposo para nosotros y una segunda fuente de luz B que corre con velocidad mayor con respecto a nosotros. Dejemos que los rayos de luz de ambas fuentes vayan por un tubo vacío, que para nosotros está en reposo y midamos si ambos rayos de luz viajan por el tubo con la misma rapidez o no. ¿Qué resultado tendremos? La teoría del éter de Lorentz demanda: “Misma rapidez” por la siguiente razón: porque la luz de ambas fuentes de luz se propagan en uno y el mismo éter.

La teoría de emisión de Ritz sin éter demanda: La fuente de luz que para nosotros se mueve envía su luz con mayor velocidad por el tubo que la fuente de luz en reposo con respecto a nosotros. La razón: La fuente de luz avienta su luz al espacio en la misma forma que una bomba al explotar avienta sus fragmentos. Una bomba en movimiento con respecto a nosotros naturalmente avienta sus fragmentos con mayor velocidad por el espacio que una bomba que –yaciendo en reposo para nosotros- explote.

Finalmente la teoría de emisión de Einstein demanda: “Misma rapidez”. ¿La razón? No hay necesidad de dar ninguna. Einstein pone esta declaración más bien como postulado a la cabeza de su teoría. De hecho lo pone como “Postulado de la constante de la velocidad de la luz”.

Por lo tanto, aquí vemos que la teoría de Einstein sin éter demanda exactamente lo mismo que la teoría del éter de Lorentz. Bajo esta circunstancia

descansa también el hecho de que en la teoría Einsteniana, un observador con respecto al cual se mueven reglas, relojes, etc, debe observar exactamente las mismas contracciones, cambios mecánicos, etc. que como en la teoría Lorentziana.

Por otro lado, la teoría Ritzeana se encuentra libre de contracciones de los cuerpos fijos, cambios mecánicos de los relojes, etc. Justamente porque (viniendo de la teoría del éter) rechaza el postulado de la constancia de la velocidad de la luz y lo reemplaza por aquel otro postulado que corresponde a la teoría de emisión Newtoniana. También dejemos que un experimento crucial indique por cual decidiría entre el punto de vista de Ritz por un lado y el de Lorentz y Einstein por el otro. Tal experimento crucial sería con ambas fuentes de luz como en todos los experimentos anteriormente mencionados.

Este experimento no se lleva a cabo porque requeriría una medición exacta, que con nuestros medios está muy lejos de poderse lograr.

Pero imaginémonos por un momento que lográramos hoy o mañana por un momento realizar este, de cualquier forma, hipotético experimento. Es decir, se desea, ajustar los resultados demandados por Ritz: Eso sería un mal impacto para la hipótesis del éter. En este momento admitiríamos con gusto que la luz sería lanzada a través del espacio vacío. Llegaríamos entonces en realidad al punto de vista de la teoría Ritzeana.

¡Pero noten ustedes por favor que algo muy distinto se nos demanda si se nos pide considerar el punto de vista Einsteniano de negar el éter! Porque entonces se nos demanda que suscribamos los siguientes tres puntos:

1. La fuente de luz nos avienta las señales de luz como productos independientes por el espacio vacío.
2. Para los rayos de luz de una fuente que se mueve con respecto a nosotros y para los de otra fuente, en reposo con respecto a nosotros, observaríamos con mediciones reales la misma velocidad.
3. Declaramos que nos satisface la combinación de estos dos principios.

¡Queridos oyentes!

Evito intencionalmente asignar una probabilidad a cualquiera de todas estas tesis en relación a la resolución futura de la crisis del éter. Me ha tocado solamente exponer esta crisis y dejar sonar la convicción de que aún no tenemos una solución completamente satisfactoria de ella.

Existe un complejo de preguntas, que tal vez tenga un papel decisivo en el destino futuro de la hipótesis del éter – nos referimos al conjunto confuso de problemas, al cual usualmente marcamos ahora con la expresión “cuanto de luz” – este complejo de preguntas no será abordado aquí, porque aún no está suficientemente claro. Tuvimos que limitarnos a aquellos criterios que fueron provistos por los resultados negativos de todos los experimentos del viento del éter. Pero fue necesario, para iluminar suficiente y multilateralmente la situación, establecer las construcciones bien separadas de las teorías de Lorentz y Einstein, además de los enunciados esquemáticos colaterales de Ritz. La muerte ha evitado que Ritz continuase desarrollando sus pensamientos, y no sabemos como habría él mismo afrontado las dificultades con las que nos hemos tropezado nosotros tratando de llenar los huecos de su trabajo.

En cualquier caso ese punto de vista merece que lo tomemos en cuenta en la dirección principal que dejó Ritz: Él inició una teoría que evita todas las contracciones y otras dificultades funcionales de los instrumentos de medición en movimiento, que son característicos de las teorías de Lorentz y Einstein.

Señores Consejeros: La confianza que me han dispensado sugiriéndome a su majestad la reina para un puesto como profesor principal en esta afamada Universidad – esta confianza la siento como un gran honor.

Estoy consciente de las difíciles responsabilidades que ahora se me imponen. Es del mayor significado para mí que el Sr. Lorentz encontró posible mantener su

insustituible eficacia para la Universidad. ¡Aprendizaje cooperativo con el Sr. Lorentz! – que es el criterio que me anima y con el que puedo hacer avanzar el departamento. Con el mejor espíritu y con cariño quiero intentar cumplir a cabalidad.

¡Señores profesores de esta Universidad! Con consciente timidez entro en su círculo. Pero me encuentro aquí un conjunto completo de hombres cuyos nombres ya había escuchado nombrar con respeto cuando era estudiante en una lejana Universidad. La simpatía y la urgencia viva con la que en sus círculos ya han ido a mi encuentro ha significado mucho para mí. Les pido poner a mi disposición su mayor experiencia cuando me quede perplejo ante algún difícil deber o esté en peligro de cometer algún error por actuar a la carrera.

Con esta última petición me dirijo hacia ustedes, caballeros, cuya disciplina es la mía – la de la física teórica – en primer lugar. Así es mi mayor deseo poner mis enseñanzas en relación orgánica con las suyas.

¡Profesor Lorentz! Cuando alguno de los más jóvenes de nosotros entra en contacto con usted, debe sentir una cosa sobre todo lo demás: usted lee en nuestras almas, como en un libro abierto. – Con una sonrisa tranquilizadora. – Usted ve no solamente nuestros pensamientos y planes científicos desenvolverse ante usted, con todos sus méritos y defectos, de los cuales nosotros mismos seremos los primeros en reconocer más tarde; usted ve también de manera clara y penetrante, en nuestros sentimientos, deseos y capacidades más puramente humanos.

Por eso claramente ve usted también esta maraña de sentimientos conflictivos con la que tomo de sus manos este departamento, que usted ha deseado entregar.

Pero con gran regocijo se me llena el pensamiento de que la enseñanza conjunta me da el gran privilegio de su cercanía personal.

¡Profesor Kamerlingh Onnes! Me siento afortunado de estar ahora en una estrecha relación con el círculo de trabajo de su famoso laboratorio de bajas temperaturas.

Gran abundancia de problemas para la física teórica han sacado a relucir las investigaciones que, en los últimos años, desde la licuefacción del helio, han salido de su laboratorio. El primer contacto con usted y su extraordinaria colaboración me han dejado sentir el intensivo estímulo que debe traerme su cercanía. – Déjeme esperar que puedo lograr colaborar con alguna contribución al gran y orgulloso trabajo conjunto que usted ha inaugurado y dirigido.

¡Profesor Kuenen! Recibo como circunstancia favorable que aquellas preguntas que estudia su trabajo experimental y aquellas preguntas cuyo tratamiento teórico siempre me han interesado a mí especialmente han pertenecido a la misma subdivisión de la física. Por eso, para mí está garantizado un contacto científico muy valioso. Quiero ir al encuentro apropiado con mi parte de la disciplina física teórica, de las intenciones que con su enseñanza general de la física les ha dado validez. – Reciba usted, por favor, mi cordial gratitud por la manera colegialmente amistosa en que usted ya ha puesto a mi disposición sus múltiples consejos.

¡Doctor Vollgraff! Ya nos hemos convencido que nuestro interés común y de colorido similar por las bases conceptuales de la física, nos llevan a un punto de encuentro. – Le doy mucho peso al intercambio de ideas con usted – Señor Vollgraff – y con los demás colaboradores científicos de esta Universidad y su Instituto.

¡Damas y caballeros estudiantes! Mis deberes para con ustedes los entiendo de la siguiente manera: Deberé contribuir con todos mis conocimientos y habilidades a que ustedes encuentren, con el menor daño posible, el camino que corresponda a la esencia de sus talentos. Las lecciones sistemáticas que sostendré para ustedes sobre las diferentes disciplinas y problemas particulares de la física teórica deben ser un medio necesario pero de ninguna manera suficiente para aproximarse a esa meta.

Sobre todo me será necesario entrar en contacto personal con cada uno de ustedes. Les pido ver en mí un camarada mayor y no un hombre que se encuentra en una etapa diferente de desarrollo científico. No puedo sentirlo de otra forma en la proximidad de nuestro más grande maestro común – del señor Lorentz.

A 2.2 Sobre la pregunta en torno a lo superfluo del éter lumínico⁴⁰⁷

1.

El Señor Einstein ha dicho:

[A] "... De ahí se sigue que una teoría satisfactoria solo se puede conseguir si renunciamos a la hipótesis del éter. El que la luz consista de campos electromagnéticos ya no aparece como condición de un medio hipotético sino como cosas independientes que emiten las fuentes de luz, exactamente como en la teoría de emisión Newtoniana de la luz. Así como de acuerdo con esta última teoría muestra a un espacio libre de radiación y de materia ponderable como realmente vacío".

Si aceptamos este punto de vista, entonces nos llevará a la suposición de que en el espacio vacío se cumplen las siguientes afirmaciones sobre la cinemática de los impulsos de luz emitidos:

[B] Los impulsos de luz que emite una fuente de luz L no acelerada viajan en esferas concéntricas, cuyo radio crece a la velocidad constante V y cuyo centro coincide siempre con L.

Dado lo anterior, consideremos el siguiente arreglo: Ante un observador no acelerado B se encuentra en reposo una fuente de luz L1, y una fuente de luz L2 viaja con velocidad constante v (por ejemplo V/2) con respecto al observador. Con ayuda de dos ruedas engranadas que giran con la misma velocidad angular el observador determina la velocidad de la luz de las dos fuentes. Una sencilla consideración muestra que de (B) se sigue que:

[C] El observador constata una mayor velocidad de la luz para la fuente en movimiento L2 que la de la fuente L1 en reposo.

⁴⁰⁷ Publicado originalmente bajo el título de *Zur Frage der Entbehrlichkeit des Lichtäthers* en *Physikalische Zeitschrift*, 13, 317-319 (1912) y reproducido en Ehrenfest (1959, pp. 303-305).

¿Qué dicen sobre la afirmación (C), primero la teoría de la relatividad Einsteiniana y en segundo lugar el experimento?

2.

El señor Einstein ha puesto como segundo postulado en su teoría de la relatividad la suposición básica,

[D] "... que la luz en el espacio vacío siempre se propaga con una velocidad V fija independiente de las condiciones de movimiento de los cuerpos emisores".

Que el Postulado [D] es incompatible con [B] y [C], eso es evidente. Para que los dos postulados Einsteinianos [D] y [A] se mantengan compatibles entre sí, es por lo visto importante que el postulado [A] se interprete de tal manera que [B] no aparezca como su consecuencia inevitable. Con este propósito debe uno pensar en la comparación que se hace en [A] con la teoría de emisión Newtoniana reduciéndola a la siguiente cláusula:

[E] La cinemática de los impulsos de luz emitidos ya no se da en la forma simétrica que ocurre en la teoría de emisión de Newton, sino con una simetría con la intensidad exacta que haga que se cumpla el postulado [D].

Uno llega entonces a un punto de vista cuya peculiaridad se puede hacer evidente por medio del siguiente estatuto.

[F] Que las fuentes de luz L_1 y L_2 envíen sus impulsos de luz con la misma velocidad a través de los aparatos de medición de los observadores, no debe en absoluto introducirse por medio de postulados del éter que lo aseguren; ya la introducción del postulado [D] lo asegura.

¿Es este punto de vista "físicamente satisfactorio"? ¿o está uno "autorizado", si no es que "obligado" a requerir una explicación del "por qué" los impulsos de luz en el espacio vacío se dispersan con la asimetría exacta, de manera que se cumpla el

postulado [D]? Evitaré discutir esto aquí; y es que en última instancia eso lo decide el gradual convencimiento o gusto. Para insistir, eso solo depende de: si uno intenta proveer de plausibilidad física a una teoría sin éter por referencia a la teoría de emisión newtoniana, a saber sin restricción (limitación) explícita de esta comparación por medio de la cláusula (E), entonces resulta mal orientado: deja pasar por alto la brecha que yace entre las dos teorías, en relación con la cinemática de la propagación de los impulsos – ya que entonces muestra al éter como totalmente superfluo.

Correspondientemente, será recomendable reservar el nombre de “teoría de emisión de los fenómenos óptico-electromagnéticos” a las teorías que hagan la suposición (B) y rechacen el postulado (D), en analogía real con la teoría de emisión de Newton en relación con la cinemática de la propagación de los impulsos.

3.

Ritz ha desarrollado una de esas teorías de emisión de los fenómenos electromagnéticos. En esta teoría los electrones emiten los potenciales retardados en concordancia con (B) y (C) y en perjuicio del postulado (D). Ritz vislumbra en el postulado (D) simplemente unos remanentes redundantes de la hipótesis del éter que de otra manera ya estaría totalmente eliminada. La finalidad de las investigaciones de Ritz fue mostrar que su teoría de emisión proporciona una teoría de la relatividad exacta que, al contrario de la teoría de la relatividad de Einstein, no requiere de ninguna contracción de los cuerpos rígidos, ni cambio en el curso de los relojes ni tampoco la suposición de la imposibilidad física de tener velocidades de propagación superiores a los 3×10^{10} cm/s. Por lo tanto, la teoría de la relatividad einsteniana sí nos lleva a esas peculiaridades porque quiere explicar en su totalidad los resultados negativos de los experimentos del tipo de los efectuados por Michelson, reteniendo el postulado (D) – que viene históricamente de la hipótesis del éter (Maxwell → Lorentz → Einstein).

4.

¿En verdad no puede uno tal vez, como Ritz desea, renunciar al postulado (D), a favor de la suposición (B)? ¿o hay algunos hechos experimentales que prohíben esto?

El mismo Ritz pone especial énfasis en la prueba de que la transición de (D) a (B) por lo general no resulta aparente al interior de las áreas experimentales bien exploradas, por la pequeñez de los efectos relevantes. Si bien él apunta en su trabajo hacia alguna prueba experimental que resulta de su Teoría, por otro lado no considera en sí misma una prueba directa del supuesto (B).

Más bien cae dentro de esto, un efecto óptico de rayos canalizados, que Ritz sugirió en una carta al Prof. Paschen, como base de un experimento crucial: "...De acuerdo con la teoría de la relatividad de Lorentz-Einstein, la longitud de la onda que envía un átomo en movimiento, debe de cambiar no solamente en la dirección del movimiento de acuerdo con el principio Doppler, sino que también debe resultar un desplazamiento hacia el rojo por una cantidad igual a $\frac{1}{2}\delta(v/V)^2$ cuando se hace una observación perpendicular a la dirección de la velocidad v ". Mientras que la teoría de Einstein demanda absolutamente la existencia de este efecto y la teoría de emisión de Ritz demanda absolutamente su no existencia, con la teoría de Maxwell queda aún abierta esta pregunta.

5.

Si uno considera qué efectos pueden conseguir una posible decisión directa entre los supuestos (D) y (B), entonces pensará uno primero en un arreglo, que fuera apropiado, para medir o para comparar entre sí inmediatamente las velocidades de la luz para fuentes de luz que se muevan con distinta rapidez. Pero aquí se interpone, como lo muestra el análisis exacto de la teoría Ritzeana, la siguiente dificultad: En tanto que el sistema de medición requiera de la reflexión en un espejo o se base en mediciones de interferencia, el resultado final dependerá solamente de miembros de segundo orden de la velocidad v con la que la fuente de luz se aproxima al

instrumento de medición. Ante esto, no se puede llegar fácilmente de esta manera a un experimento crucial factible que decida entre la suposición (D) Einsteniana y la suposición (B) Ritzeana.

6.

Uno puede esperar llegar a algunas otras formas de decisión clara entre (D) y (B). Porque hay ciertamente algunas áreas en las cuales el paso de (D) a (B) debe resultar claramente perceptible. Sigamos las consecuencias peculiares de, por ejemplo, la teoría de emisión, respecto a la cinemática de los frentes anterior y posterior de los rayos Röntgen: Un electrón se mueve de izquierda a derecha con la velocidad v (por ejemplo, igual a $0.9 V$) y pierde esta velocidad en un muy pequeño tramo de frenado. Los Potenciales retardados que serían enviados al inicio del tramo de frenado, se propagan en esferas cuyo centro continúa a la velocidad v , moviéndose hacia la derecha. Para los Potenciales retardados que se envían al final del tramo de frenado, el centro de la esfera permanece quieto. Si uno sigue la propagación de estas primeras y últimas esferas de potencial, entonces reconoce uno fácilmente que en la dirección hacia la derecha, la distancia entre ellas será cada vez mayor en tanto más se propaguen – en tanto que hacia la izquierda, primero encontramos una aproximación, luego un adelanto de la anterior a través del retraso del potencial (en la vecindad más próxima del tramo de frenado) y enseguida igualmente una separación en aumento -, siendo por lo tanto que el “ancho de los impulsos” de los impulsos Röntgen tendrían diferente tamaño a diferentes distancias de la posición de frenado, a saber que, a la distancia de unos centímetros ya tendría un orden de magnitud de un centímetro.

Este resultado es naturalmente inaceptable. Pero por este camino una reducción al absurdo convincente de la suposición (B) difícilmente ganará; porque aún quedan muchas salidas abiertas, por ejemplo, la suposición de que durante el proceso de frenado los potenciales enviados forman juntos ya una entidad física y que se propaga conjuntamente con una velocidad media; o cualquier otra modificación de la hipótesis sobre el origen de los rayos Röntgen.

De todos modos, este ejemplo es característico de algunas peculiaridades que surgen con el paso de (D) a (B).

7.

Las observaciones anteriores muestran al menos la posibilidad en principio de una decisión experimental entre el postulado Einsteiniano (D) y la suposición Ritzeana (B). Ahora imaginemos que alguien logre encontrar pronto un plan para un experimento crucial factible y práctico que decida entre (D) y (B). ¿Qué situación surgiría?

Los seguidores de la hipótesis del éter deben desear que el postulado (D) se cumpla a cabalidad.

Los seguidores de la verdadera teoría de emisión deben desear que se confirme la suposición (B).

Los seguidores de la teoría de la relatividad Einsteiniana deben desear que esta vez los seguidores de la teoría del éter realmente se mantengan en contra de los seguidores de la hipótesis de emisión.

Sobre la base de estas consideraciones uno puede estar seguro en qué sentido el Sr. Einstein dice de su teoría de la relatividad que: la teoría puede prescindir de la hipótesis de un éter lumínico en tanto que para ella ya sean suficientemente completos el postulado (D) y demás suposiciones como la concerniente a la imposibilidad de una velocidad de propagación superior a los 3×10^{10} cm/sec.

A 3.1 Sobre una tarea del cálculo de probabilidades, en conexión con la interpretación cinética del incremento de la entropía⁴⁰⁸

Sin discutir de entrada la conexión sugerida en el título, nos enfocamos de inmediato a una cuestión especial. Se nos dan N bolas (por ejemplo 100). Las mismas son numeradas en forma consecutiva del 1 al N para poder distinguirlas individualmente. Se reparten inmediatamente en dos urnas, de tal manera que la urna A contenga P_0 (por ejemplo 90) y la urna B tenga $Q_0 = N - P_0$ (correspondientemente 10) bolas. Pero no se sabe qué bolas quedaron en A y cuáles en B. En una bolsa se encuentran N cartas de lotería numeradas del 1 al N . Cada 10 segundos se saca una carta, se anuncia su número, se regresa a la bolsa y se mezcla bien. Luego se escoge otra, se anuncia, etc. Cada vez que se anuncia un número, la bola que lleva ese número salta de la urna en la que se encuentra hacia la otra urna y permanece ahí hasta que más tarde vuelva a salir su número. Es claro que: siempre es más probable que la bola escogida se encontrará en la urna más llena y no en la más vacía. Por lo tanto, en tanto que la urna A siga estando mucho más llena que la urna B, la mayoría de los siguientes resultados del sorteo vaciarán la urna A en la urna B y solo rara vez sacarán una bola de la urna B.

A manera de ilustración: En un papel milimétrico, un avance horizontal de un milímetro significa el paso del r -ésimo resultado del sorteo al $r+1$ -ésimo. En el punto correspondiente al punto milimétrico r -ésimo ponemos, como ordenada, el valor

$$y_r = |P_r - Q_r| \quad y_0 = |P_0 - Q_0|$$

siendo P_r y Q_r los contenidos de la urnas después del r -ésimo resultado del sorteo. $|P_r - Q_r|$ es el valor absoluto de su diferencia. Se sigue así como consecuencia de los puntos, que uno puede tal vez pensar cómodamente en conectarlos por medio de

⁴⁰⁸ Escrito conjuntamente con su esposa Tatiana y publicado originalmente bajo el título de *Über eine Aufgabe aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung, die mit der kinetischen Deutung der Entropievermehrung zusammenhängt* en Math-Naturw. Blätter, 3 (1906) y reproducido en Ehrenfest (1959, pp. 128-130).

líneas rectas. El primero punto queda en una posición relativamente alta $y_0 = 80$. Cada punto quedará siempre dos unidades más abajo o dos unidades más arriba que el anterior. No hay ninguna otra tercera posibilidad. En tanto que y_r posea un valor alto, encontraremos como regla general que y_{r+1} irá disminuyendo. La “curva” muestra entonces antes que nada una decidida tendencia a ir hacia abajo, y solo de vez en cuando se mantendrá a nivel o irá varios pasos hacia arriba. Si ya ha descendido lo suficiente (los contenidos de las urnas ya no son significativamente diferentes), entonces ya esos resultados “erróneos” del sorteo se hacen más frecuentes: el movimiento cuesta abajo se suavizará. Al final, correrá a lo largo del eje nulo, llenándose pronto un poco más a veces una urna y a veces la otra. - ¿Correrá ahora siempre en todo tiempo futuro alrededor del nivel cero? – No. Imaginemos que el proceso continúa por un tiempo muy largo. La secuencia de una serie de eventos, que lleve otra vez a una diferencia significativa o grande entre P y Q, puede ser muy pequeña. Pero incluso para cuando el sorteo ocasionalmente reúna todas las 100 bolas en B, incluso en ese caso la probabilidad es solo muy pequeña, pero nunca cero. (Su valor se puede calcular fácilmente). Por lo tanto, cuando uno continúa el proceso por un tiempo suficientemente largo, se hace al final enormemente improbable evitar estas “jorobas” altas y extremas en la curva que se prolonga indefinidamente. Sin embargo, esto no lo es todo. Ahora la curva se continúa posiblemente tanto, hasta que aparezcan un par de miles de veces estas extrañas jorobas. Entonces la curva correrá predominantemente a lo largo del valor cero, elevándose de manera significativa solo rara vez, y de manera excepcional mucho muy de vez en cuando.

Cada vez, cuando en el curso del proceso de sorteo encontramos otra vez 80 bolas más en una urna que en la otra, estaremos naturalmente dispuestos a apostar que la diferencia en el siguiente paso del sorteo disminuirá a 78. Porque es 9 veces más probable que la siguiente bola seleccionada sea una de las 90 que están en el recipiente más lleno y no una de las 10 bolas que están en el recipiente más vacío. ¿Cómo se expresa esta circunstancia en el curso cambiante de la curva? ¿Desde los puntos que tienen un valor $y = 80$, se mueve la curva con una frecuencia nueve veces mayor hacia abajo que hacia arriba? Surge por sí misma la siguiente escena: si

trazamos a la altura $y=80$ una línea recta horizontal, entonces esta línea corta o pasa por todos los puntos considerados arriba. Si esta línea coincide con la curva 10001 veces en un punto que se encuentre en la pendiente derecha (descendiente) de una joroba, entonces debe coincidir con la curva al menos 10000 veces en un punto que se encuentre en la pendiente izquierda (ascendente) de una joroba. Ya que para poder salir de un pico por el lado derecho, siempre debe haber sido alcanzado primero por el lado izquierdo. ¿Pero no nos lleva esto a decir: la curva irá hacia arriba con tanta frecuencia como hacia abajo en las intersecciones con esta línea recta? ¿No debe entonces uno ser precavido de apostar que la diferencia decrecerá de 80 a 78?

Naturalmente que la apuesta está completamente justificada y el error en la consideración geométrica es muy fácil de encontrar. La clarificación detallada de este error posee un cierto interés especial porque ayuda a dilucidar una objeción muy interesante, pero injustificada, que ha surgido repetidamente en contra del teorema H de Boltzmann (interpretación cinética del incremento de entropía). Boltzmann ha desarrollado un ejemplo para la defensa de esta objeción especial, con el cuál, lo aquí mencionado coincide en todos sus aspectos esenciales.

Uno se da cuenta fácilmente de que: La aparente contradicción desaparece si a la altura $y=80$ ocurren muchos máximos de la curva en cantidad suficiente. Entonces, a pesar de lo que se había anotado anteriormente, en el siguiente paso a partir de una altura 80, la curva irá con mayor frecuencia cuesta abajo que cuesta arriba. Proporcionalmente deben suceder aún más máximos en alturas mayores. (Con $y=100$ ocurren de hecho únicamente máximos). Si uno trata de imaginar como progresa la curva, uno se topa de entrada con nuevas dificultades. Se resuelven si uno calcula todas las cantidades en consideración aquí. En relación con estos cálculos, nos permitiremos algunas indicaciones:

Imaginemos la curva continuada por un largo tiempo. $Z(y)$ es el número de puntos de la curva que ocurren a la altura y . La probabilidad de que la curva baje en el siguiente paso estando en uno de estos puntos es:

$$f(y) = \frac{N + y}{2N}, \quad (\text{A})$$

y de que suba:

$$S(y) = \frac{N - y}{2N} \quad (\text{B})$$

El número de saltos de tipo $(y \rightarrow y - 2)$ es entonces:

$$Z(y)f(y) = Z(y) \frac{N + y}{2N} \quad (\text{C})$$

De manera análoga se encuentra para el número de saltos del tipo $(y - 2 \rightarrow y)$ la cantidad:

$$Z(y - 2) \cdot S(y - 2) = Z(y - 2) \cdot \frac{N - (y - 2)}{2N} \quad (\text{D})$$

Siguiendo fundamentos geométricos, la curva debe hacer el salto $(y \rightarrow y - 2)$ con tanta frecuencia como el salto $y - 2 \rightarrow y$. Con lo cual se llega a la formula recursiva:

$$Z(y) = Z(y - 2) \frac{S(y - 2)}{f(y)} = Z(y - 2) \frac{N - (y - 2)}{N + y} \quad (\text{E})$$

Se puede ver entonces que es igualmente probable que la curva vaya hacia y o hacia $y-2$. ($N=100$, $y=80$ nos lleva a: $Z(80):Z(78)=22$; $y=98$ nos lleva a: $Z(98):Z(96)=4:198$.)

La parte que rodea cada punto con un valor de y alto posee una de las siguientes formas: α) $(y - 2) - y - (y - 2)$; β) $(y - 2) - y - (y + 2)$; γ) $(y + 2) - y - (y - 2)$; δ) $(y + 2) - y - (y + 2)$. Se calcula fácilmente que la frecuencia de estas cuatro formas se comporta como:

$$\alpha:\beta:\gamma:\delta = [(f(y) \cdot f(y))]: [f(y) \cdot S(y)]: [S(y) \cdot f(y)]: [S(y) \cdot S(y)]$$

O bien, si uno divide todos los miembros entre $f(y) \cdot S(y)$ y se utilizan las expresiones para f y S dadas en A y B:

$$\alpha : \beta : \gamma : \delta = \frac{N+Y}{N-y} : 1 : 1 : \frac{N-y}{N+y} \quad (\text{F})$$

Para y cercano a N , α es mas grande y δ mas pequeño. Esta última circunstancia significa que: la pendiente de la curva, en sus valores más altos, va mas bien cuesta abajo de manera suave. De las ecuaciones E y F se puede leer todo lo relativo al comportamiento promedio de la curva.- En suma, podemos decir que:

I. La “curva” que se ha discutido tiende, como regla general, a decrecer a partir de sus puntos situados más altos y solo de vez en cuando progresa hacia arriba.

II. Este enunciado aplica – y esto suena especialmente paradójico al principio – tanto si uno recorre la curva de izquierda a derecha o de derecha a izquierda.

A 3.2 Ludwig Boltzmann⁴⁰⁹

Cuando Boltzmann era estudiante, la teoría cinética de los gases ya poseía un alto grado de desarrollo, así como de complicación matemática, aun cuando la publicación del trabajo fundamental de Clausius y Maxwell se había dado solo unos pocos años antes. La interpretación cinética de la difusión, de la conducción térmica, de la fricción interna, etc. podía ya ser examinada y confirmada experimentalmente. La comparación entre teoría y observación había conducido a los valores de ciertas cantidades – por ejemplo la velocidad, el diámetro, la masa de una molécula – cuyas mediciones directas son inaccesibles. La teoría cinética tenía dos extraordinarios representantes en los maestros, y más tarde amigos de Boltzmann: Stefan y Loschmidt. (En el año de 1865 se presentó el famoso trabajo de Loschmidt sobre el tamaño de las moléculas del aire). Numerosas sugerencias del mismo Boltzmann nos permiten concluir que el contacto íntimo con estos dos físicos contribuyó sustancialmente para que él penetrara tan rápida y profundamente en el cuerpo de ideas en el que muy pronto intervendría de manera innovadora.

De acuerdo a las condiciones que presentaba la teoría en ese tiempo, un nuevo acercamiento solo habría sido posible tomando parte en el perfeccionamiento de los experimentos o en el mejoramiento de los cálculos aproximados de los cuales dependía la teoría cinética de la conducción térmica, la difusión, etc. Para empezar había que superar una serie de dificultades que se encontraban en la frontera de los experimentos de Stefan o en la fuerza penetrante de los cálculos Maxwellianos.

Sin embargo, Boltzmann se acercó de inmediato a la teoría cinética con una pregunta completamente nueva, con la cuál, a sus 20 o 21 años, abrió una inmensa área de investigación en la que al principio solo él trabajaría y más tarde también Maxwell. El problema que él planteó se puede formular así: Helmholtz había mostrado que la primera y principal ley de la teoría del calor (la ley de la energía) se puede derivar de la suposición de que todos los procesos físicos son

⁴⁰⁹ Publicado originalmente bajo el título de *Ludwig Boltzmann*. † en *Math-Naturw. Blätter*, 3 (1906) y reproducido en Ehrenfest (1959, pp. 131-135).

fundamentalmente procesos mecánicos, y por lo tanto la ley de la energía no era otra cosa sino el bien conocido principio de las fuerzas vivas en la mecánica. – Ahora Clausius había establecido la segunda ley (la ley de la entropía, la ley de la transformación incompleta del calor en trabajo). Todos los procesos físicos, en los que interviene el calor, están sujetos a ella. Especialmente en el comportamiento de los gases. Todas las características de los gases se pueden comprender con la teoría cinética si uno los contempla como sistemas mecánicos con una cierta estructura. ¿No debería ser la segunda ley también un principio puramente mecánico? La teoría cinética de los gases ya había clarificado la interpretación mecánica de la temperatura: Dos cuerpos que están en contacto igualan sus temperaturas - por medio de los impactos entre moléculas, la energía cinética media de las moléculas de ambos cuerpos alcanza el mismo valor. Eso era un indicador importante en la búsqueda del principio mecánico al que debiera corresponder la ley de la entropía. En 1866 Boltzmann publica su primer trabajo sobre este tema “La interpretación mecánica de la segunda ley de la teoría del calor”. Ahí se desarrolla un principio para sistemas mecánicos completamente generales, que muestra un notable parecido analítico con la ecuación $\Delta Q/T = \Delta S$ de la termodinámica. Pero este resultado parece haber satisfecho a Boltzmann solo por un tiempo breve. Pronto surgió que: En un sistema mecánico completamente general, no se puede ilustrar la separación natural entre el calor y las demás formas de energía. Y de esta oposición trata precisamente la ley de la entropía. El problema modificado queda entonces como: ¿cuáles son las suposiciones que deben venir junto con los axiomas mecánicos generales para poder probar la interpretación mecánica de la ley de la entropía? Estas suposiciones tenían que ser suficientemente generales, para incluir no solo los gases, sino también los líquidos y los cuerpos rígidos. Resultaba valioso seleccionar de entre las suposiciones que interpretan todas las cualidades de los gases a partir de la teoría cinética, aquellas que determinan su comportamiento termodinámico general. Así, las publicaciones de los siguientes 5 años se dedican a problemas auxiliares: ¿Cómo se distribuye la energía total de un cuerpo caliente en equilibrio térmico entre las diferentes moléculas y átomos en las moléculas en forma de energía cinética de translación, de rotación y movimientos internos de las moléculas y en forma de energía potencial

entre las moléculas y los átomos en las moléculas? Los resultados de Boltzmann fueron amplias y fructíferas extensiones de teoremas que habían sido planteadas en formas más particulares en parte por Clausius y en parte por Maxwell (así de la distribución Maxwell-Boltzmann e^{-hE} , se sigue el teorema: en equilibrio térmico, la energía cinética media para todos los grados de libertad de los cuerpos poseen el mismo valor proporcional a la temperatura absoluta). Para llegar a estos resultados, Boltzmann tuvo que construirse él mismo todo un nuevo conjunto de términos y conceptos mecánicos (por ejemplo el concepto de Ergódico).

Con estos resultados se llegó a un nuevo fundamento para el problema básico: En 1871 apareció el trabajo: “Prueba analítica de la segunda ley fundamental a partir de las leyes del equilibrio de las fuerzas vivas”. Ahí se muestra que: la ecuación de Carnot-Clausius [$A = (T_2 - T_1)Q_1/T_1$], que indica cuanto calor se transformará en trabajo mecánico en un proceso cíclico reversible, se basa en las leyes simples según las cuales la energía total dada se distribuye entre las moléculas. De nuevo, estas leyes se basan ahora, de la misma manera, en las leyes de la mecánica y en las regularidades estadísticas que aparecen en medio de los movimientos aleatorios. Ya los primeros conceptos de la teoría cinética son de naturaleza estadística (por ejemplo, el número de moléculas “por unidad de tiempo” que golpean la pared, etc.). También de manera particular la interpretación del equilibrio térmico es de carácter estadístico. Pero la demarcación más exacta respecto hasta qué punto la ecuación de Carnot-Clausius se basa en la mecánica y hasta qué punto en las leyes estadísticas del movimiento de las moléculas, esta demarcación fue un logro significativo y de dificultad poco común. La idea: “la entropía es una ley probabilística” empieza aquí. Esa idea se profundizaría de manera extraordinaria en los siguientes trabajos de Boltzmann.

Con el último trabajo se habían comprendido las transiciones reversibles entre estados de equilibrio. Ya en el año siguiente (1872) aparece el famoso trabajo de Boltzmann sobre el teorema H, que resuelve también el mucho más difícil problema de los procesos irreversibles. Para ellos, la ley de la entropía dice: Dejemos un sistema a la deriva –llevado fuera del equilibrio térmico-, entonces la entropía

aumentará cada vez más, con el proceso tumultuoso que le sigue, hasta llegar al máximo valor que pueda alcanzar bajo las condiciones dadas (con la energía total dada, el tamaño del recipiente, etc.). Este valor representa la nueva condición de equilibrio. -Ese trabajo define una función (H) cuyos argumentos son datos cinéticos. Es la interpretación cinética de la entropía. -Se procede a partir de una condición de movimiento de las moléculas, que es diferente del equilibrio estadístico. Entonces, el número de moléculas, que por ejemplo a través de colisiones, se mueven hacia un lado por unidad de tiempo, es aún diferente a aquel número de moléculas que se mueven hacia el otro lado en el mismo tiempo; de esa manera cambia el número de moléculas que tienen al mismo tiempo un cierto estado de movimiento, tanto tiempo como sea necesario, hasta que se alcanza el equilibrio estadístico. Estos movimientos cambian los argumentos de la función H. El valor de H provee una medida de la desviación aún existente del equilibrio térmico. La prueba del teorema H de Boltzmann muestra ahora que: la cantidad H siempre cambia debido al movimiento azaroso de las moléculas en la misma dirección, hasta que alcanza el valor límite H_0 , que corresponde al nuevo equilibrio. Para obtener los cambios de los argumentos de H, se tiene que calcular primero con qué frecuencia ocurren los diferentes tipos de colisión por unidad de tiempo. Este cálculo depende (como con Clausius y Maxwell) de un punto de partida de la probabilidad de colisión de las moléculas desplazándose unas contra las otras. El cálculo del teorema H muestra muy claramente que: El resultado de que H cambie siempre solo en una dirección, viene solamente por la condición, que uno establece como frecuencia de las diferentes colisiones, que surge del cálculo de probabilidad. El caso ocasional de un proceso opuesto para H (y por lo tanto de una reducción ocasional de la entropía) aparece correspondientemente solo como inmensamente improbable, pero no imposible; y entonces el comportamiento de la entropía para los procesos irreversibles también está basado en la probabilidad.

Después de otros 5 años (1877) aparece como cumbre de este conjunto de ideas el trabajo: “Sobre las relaciones entre la segunda ley fundamental de la teoría mecánica del calor y el cálculo de probabilidades”. Un ejemplo trivial explica relativamente el conocimiento comprensivo que nos atañe aquí: El de un enorme número de moléculas de oxígeno e hidrógeno que se encuentran en un contenedor.

Uno se puede imaginar el contenedor dividido en 1000 partes iguales y formar una distribución de moléculas, dando instrucciones a cada molécula individual de posicionarse en una de las 1000 partes. Luego puede uno hacer una nueva distribución una y otra vez, hasta agotar todas y cada una de las posibles distribuciones. Se puede mostrar que: La inmensa mayoría de todas estas distribuciones corresponde muy cercanamente a una disposición homogénea de ambos gases en todo el contenedor. Aquellas distribuciones, que corresponden a desviaciones importantes de esa disposición, son mas raras mientras mayor la desviación. Si uno le quiere llamar a estas frecuencias relativas “probabilidad”, entonces uno llega a la declaración siguiente: la disposición homogénea de ambos gases es enormemente “más probable” que una no homogénea. Por otro lado, cada disposición no homogénea (capaz de difusión) tiende hacia una homogénea: el proceso irreversible de la difusión existe en una transición de una condición “improbable” a una “más probable”. Ese trabajo enseña como expandir esta declaración a procesos irreversibles más generales: Cada proceso irreversible lleva a un sistema del estado A con entropía S_A al estado B con entropía (mayor) S_B , es decir: por medio de los movimientos azarosos de las moléculas, la condición A con la “probabilidad” W_A cambia a la condición B con la probabilidad más grande W_B . Esto es

$$S_A : S_B = \lg W_A : \lg W_B$$

La entropía de una condición térmica es proporcional al logaritmo de la cantidad de formas diferentes en que uno puede acomodar la condición térmica prescrita con las moléculas dadas.

Los tres trabajos de 1871, 1872 y 1877, juntos representan la respuesta a la pregunta que había planteado Boltzmann al principio de su actividad: La ley de la entropía es un principio mecánico-estadístico. El gran número de sus restantes publicaciones sobre la teoría de los gases, se puede ver en lo fundamental como fruto del trabajo que le había dedicado a su lucha con esta respuesta: Una plétora de resultados, que se habían ajustado a estos caminos (por ejemplo la distribución e^{-hE}) abrieron métodos completamente nuevos para el tratamiento de aquellos problemas

cinéticos que antes, o no podían ser realmente tratados (como por ejemplo la derivación cinética de la ecuación de disociación) o podían serlo solo con métodos incompletos (como por ejemplo las desviaciones de $pV = RT$).

A pesar de estos nuevos impactantes caminos que se desarrollan aquí, esa serie de trabajos muestran una imagen maravillosamente unitaria: Boltzmann ve útil el explicar los movimientos azarosos de las moléculas. En este caos él busca probar aquellas regularidades estrictas, cuya existencia se garantiza en las leyes termodinámicas encontradas. A pesar de las dificultades iniciales y a pesar de algunas aparentes contradicciones, él se mantiene convencido de que las hipótesis de las que ya se dispone sobre la estructura de los cuerpos y la mecánica son suficientes para la interpretación de la ley de la entropía. La dificultad estriba en la localización y el tratamiento de una representación matemática que muestre el movimiento de las moléculas, por así decirlo, desde una distancia media: ni tan cerca que se conviertan en caos, ni tan lejos que dejen de ser un proceso mecánico. En todos estos trabajos el énfasis reside no en la construcción de nuevas hipótesis, sino en derivar ciertas conclusiones excepcionalmente sumarias a partir de las hipótesis ya aceptadas.

Un segundo gran problema acompaña igualmente a Boltzmann desde el inicio de su carrera. Y de nuevo se trata de obtener una interpretación mecánica de las leyes de una vasta disciplina de la física, la de los fenómenos de los campos electromagnéticos. Aquí el énfasis recae en la construcción de la vieja hipótesis sobre la estructura oculta del éter. Probablemente ni Boltzmann ni los otros físicos (ingleses) que afrontaron este problema tuvieron éxito en desarrollar de manera satisfactoria dicha interpretación mecánica. Estos intentos de Boltzmann de integración de componentes estables forman parte del trabajo de su vida, los cuáles se quedan relativamente atrás de sus intentos, por mucho más numerosos y exitosos, sobre la interpretación mecánica de los fenómenos térmicos. Aquí también encontramos conexiones de su trabajo con Maxwell. Maxwell había continuado con la exigencia de Faraday de que los fenómenos electromagnéticos debían tratar de ser descritos y entendidos como perturbaciones no solo de los cuerpos sino también del espacio entre los cuerpos. Maxwell había procedido a partir de concepciones muy

detalladas sobre la estructura del éter. El supuso la existencia de celdas llenas de un fluido, las cuáles se transfieren entre sí movimiento de rotación por medio de ruedas de fricción. La rotación de las celdas corresponde a la excitación magnética del campo, en tanto que el desplazamiento de las ruedas de fricción, a la eléctrica. Esta imagen le ayudó a Maxwell a construir sus ecuaciones, las cuales establecen bajo que leyes se propagan las excitaciones eléctricas y magnéticas en el éter y en los cuerpos. Con la presentación de estas ecuaciones se abrió un nuevo campo de trabajo, al cual Maxwell dirigió todo su esfuerzo; se deberán poder derivar de estas ecuaciones: las leyes de la electrodinámica clásica, las leyes de Farady, las leyes de propagación de la luz; y más aún las ecuaciones básicas de los cuerpos en movimiento se generalizarían, etc. En esta parte deductiva del trabajo de Maxwell, toma parte Boltzmann con sus conocidas investigaciones experimentales. Pero su principal interés se mantiene dirigido a aquellas partes del trabajo Maxwelliano donde aparecen en primer lugar las interpretaciones mecánicas de los procedimientos eléctricos. Después de haber obtenido sus ecuaciones, ya no regresa a las imágenes especiales de la estructura del éter. En la interpretación que da Maxwell de la teoría en su obra principal, solo se establecen y se usan heurísticamente analogías más generales que existen entre los efectos electromagnéticos del tipo de autoinducción (con corrientes variables) y las reacciones inerciales que surgen con una clase muy general de sistemas mecánicos (en el caso de cambios de velocidad). Estas analogías entre el comportamiento de “sistemas cíclicos” y los efectos recíprocos de las corrientes (en la segunda parte del segundo volumen de “Electricidad y Magnetismo”) no aparecen de ninguna manera en primer plano en la representación Maxwelliana.

La representación de Boltzmann de la teoría de Maxwell usa directamente esta analogía mecánica. (En contraste con todas las otras representaciones de esta teoría). En las lecciones de Boltzmann, uno tenía que estudiar antes que nada las maravillosas reacciones que el sistema mecánico puro (el bicicleta), relativamente muy primitivo, nos permitía experimentar. Reacciones del tipo que uno nunca esperaría de un sistema mecánico, en tanto que uno piensa de manera automática en un “sistema mecánico” como un sistema planetario. En el estudio de estos sistemas se debe

entrenar la imaginación más y más para penetrar en la construcción de un mecanismo libre de contradicciones hasta el último detalle, que explique las complicadas características del éter lumínico. La representación especial con las celdas y las ruedas de fricción nunca pretendieron desde luego ser suficientes para cumplir con esta exigencia. Pero no se excluía que otra construcción llevara a esa meta. Algunas pistas, aunque muy generales deberían de proveer las analogías de los sistemas cíclicos mencionados anteriormente. Por esa razón sus discusiones detalladas forman el núcleo de las discusiones de Boltzmann sobre Electromagnetismo y le dan su estructura particular.

Hasta ahora no se ha conseguido llevar a cabo tal construcción. La teoría de los electrones recientemente casi ha sugerido el intento de explotar esa analogía en sentido inverso: hacía una interpretación electromagnética de los fenómenos mecánicos (especialmente de la masa inercial). Boltzmann no titubeó en recibir con beneplácito ese intento.

Las imágenes mecánicas son el material con el que preferentemente Boltzmann le da forma a sus creaciones. El enfatiza repetidamente lo esencial que es, para la satisfacción en torno a un descubrimiento, el efecto sensible del material en el que toma lugar el descubrimiento.

“Si se me preguntara, como a Solon, por el más suertudo de los mortales, sin duda nombraría a Colón. No como si otros no lo igualaran ya desde el alemán Gutenberg. Pero la suerte esta condicionada por el efecto sensible y éste debe estar a una mayor nivel con Colón” (lecciones populares).

Que dejara jugar en la imaginación toda esta confusión de movimientos, fuerzas y reacciones al movimiento para comprenderlos, preparó por lo visto a Boltzmann a un placer estético intenso. Eso se reconoce en numerosas presentaciones en sus lecciones sobre Mecánica, Teoría de los Gases y sobre todo de Electromagnetismo. En sus lecciones y seminarios Boltzmann no se contentaba nunca con una caracterización solamente sumaria o analítica de sus modelos mecánicos. Sus construcciones las llevaba hasta las últimas consecuencias. Si surgen,

por ejemplo, muchas posibilidades de relaciones cinemáticas, de la misma manera se debe llevar también el ordenamiento mental para que no las enrede. También en aquellos grandes trabajos cuyos resultados abarcan un área muy grande, el ejemplo simple encuentra un tratamiento exhaustivo y apasionado. Estos caminos hacen que los desarrollos de Boltzmann resulten, de manera poco común, muy vivas: La manera de desarrollar los ejemplos que, con sencillez extrema, siempre exhiben ya todas las formas características de los grandes problemas, nos da una visión de todo el laborioso trabajo que esta inmensa imaginación había realizado antes de penetrar en los resultados de mayor alcance.

No podemos continuar con el gran número de otros trabajos más aislados, aunque podemos decir que entre los más pioneros, encontramos la derivación de las leyes de la radiación de Stefan-Boltzmann (1884). Una gran parte de estos trabajos parecen haberse originado a partir de intentos de visualizar ideas muy generales por medio de modelos mecánicos muy sencillos: En un modelo primitivo, Boltzmann muestra en 1884 que la analogía desarrollada por Helmholtz entre movimientos monocíclicos y la termodinámica es insuficiente, y 20 años más tarde reconoce, por medio del mismo modelo e independientemente de sus predecesores, que en el caso de coordenadas no simétricas las ecuaciones de Lagrange reciben términos adicionales. De manera similar hizo ver muy pronto que había algunas lagunas en la teoría matemática del movimiento de los cuerpos rígidos en líquidos. Muchos más ejemplos se podrían mencionar (por ejemplo, “Preguntas en torno a un ejemplo que concierne a la mecánica Hertziana”) que apuntan una y otra vez a cómo las creaciones de Boltzmann están influenciadas por el placer estético que la interrelación de fuerzas y movimientos le causaban.

¿Cambiarán aquellos resultados de Boltzmann de su versión mecánica hacia alguna otra versión completamente diferente? ¿Causarán los avances en la termodinámica de la radiación que en alguna presentación futura del intercambio de calor y del equilibrio térmico se agote la preferencia del influjo de las colisiones moleculares y cambie hacia la radiación? Este cambio, o incluso uno mayor, en la representación del equilibrio térmico, desplazaría también la interpretación de la ley

de la entropía como un principio mecánico-estadístico hacia una nueva interpretación, con imágenes sustancialmente diferentes a las que fueron la base del trabajo de Boltzmann.

Esta transición de formas, cuyos “efectos sensibles” no tienen nada en común con los efectos sensibles de la forma original, parece ser el destino frecuente de los logros científicos más importantes; y también de aquellas, cuya forma e “instrumentación” original se fundamentan tan profundamente en el gusto artístico de sus creadores, como es el caso justamente del trabajo de Boltzmann.

A 3.3 Sobre dos conocidas objeciones contra el teorema H de Boltzmann⁴¹⁰

1. En su formulación usual, el Teorema H significa que: Si al dejar evolucionar por sí mismo el modelo cinético de un gas, éste pasa en el transcurso de sus movimientos por los estados

$$\dots Z_1, Z_2 \dots\dots Z_n \dots\dots \quad (\text{A})$$

en los tiempos $T_1, T_2 \dots\dots T_n \dots$, entonces se cumplen las siguientes desigualdades para los valores consecutivos de la cantidad H :

$$\dots H_1 > H_2 > H_3 \dots\dots > H_n \dots\dots \quad (1)$$

La cantidad H se comporta como la entropía tomada negativamente.

2. La objeción de reversibilidad de Loschmidt. Primeras observaciones: Para dos estados Z_z, Z'_z todas sus moléculas poseen 1. misma posición, 2. mismas velocidades pero opuestas. Entonces

$$H'_z = H_z \quad (2)$$

El modelo cinético del gas es un sistema mecánico conservativo. Si es capaz de los movimientos que corresponden al renglón de estados (A), entonces exactamente de la misma manera es capaz de los movimiento correspondientes a

$$\dots Z'_n, Z'_{n-1} \dots\dots Z'_1 \dots\dots \quad (\text{B})$$

Con estos movimientos, se sigue de (2) y (1) que

$$\dots H'_n \leq H'_{n-1} \dots\dots \leq H'_1 \dots\dots \quad (3)$$

⁴¹⁰ Escrito conjuntamente con su esposa Tatiana y publicado originalmente bajo el título de *Über zwei bekannte Einwände gegen das Boltzmannsche H-Theorem* en *Physikalische Zeitschrift*, 8, 311-314 (1907) y reproducido en Ehrenfest (1959, pp. 146-149).

Para cada movimiento del modelo para el cuál H decrece de H_1 a H_n , se puede indicar un movimiento al revés, para el cuál H aumenta exactamente de manera opuesta de H_n a H_1 .

3. La objeción de recurrencia de Zermelo. El señor Zermelo, como bien se sabe, ha dicho, basándose en un teorema mecánico de Poincaré, lo siguiente: El modelo usual de un gas completamente aislado se comporta de manera cuasi-periódica.

El movimiento que tiene el modelo genera la secuencia de estados (A), desde Z_1 hasta Z_n , con la caída de H desde un valor relativamente alto H_1 a uno más pequeño H_n . Resulta entonces que después de un tiempo finito (aunque de enorme duración), se obtendrá, en su evolución sin perturbación, una secuencia de estados

$$\dots(Z_1), (Z_2)\dots\dots (Z_n)\dots\dots \quad (C)$$

que coincide en todos sus datos, tan cerca como se quiera, con (A). Por lo tanto los valores de H pasarán por

$$\dots(H_1), (H_2)\dots\dots (H_n)\dots\dots \quad (4)$$

donde (H_z) es muy cercano a H_z . Debido a que $H_1 > H_n$ y a que (H_1) es muy cercano a H_1 , se sigue

$$(H_1) > H_n \quad (5)$$

Por consiguiente, en el transcurso de los movimientos de Z_n a (Z_1) , la función H ha tomado, contrario a la formulación anterior del teorema H , valores más grandes. El comportamiento cuasi-periódico de los modelos de gases aislados muestra que: El teorema H en su formulación anterior no puede ser correcto.

4. El punto de vista de Boltzmann en relación con estas dos objeciones. El cálculo del Teorema H se apoya expresamente en ciertos principios probabilísticas.

Las desigualdades obtenidas (1) deben entenderse correspondientemente en el siguiente sentido: Uno debe tomar en su totalidad todos los posibles movimientos mecánicos juntos; cada movimiento en su extensión ilimitada. Uno extrae todas las fases de movimiento P_A para las cuales H posee un valor H_A que se desvía fuertemente del mínimo. Ahora considera uno las secuencias de estados que corresponden lateralmente a P_A . Después de un cierto intervalo τ , que uno puede escoger a discreción, pero al menos tan grande como para que cubra numerosas colisiones en el modelo, se llegará a valores finales muy diferentes de H , a los cuales llamaremos H_B . Existen tres posibles casos:

$$\text{I. } H_B < H_A, \quad \text{II. } H_B = H_A, \quad \text{III. } H_B > H_A.$$

A. El Teorema H nunca requiere ni impone que el caso III sea imposible.

B. Lo que probablemente sí afirma el teorema H es: Si H_A difiere considerablemente del valor mínimo, entonces la frecuencia relativa de aquellas P_A que llevan a los casos II y III, es tan pequeña que se desvanece comparada con la frecuencia relativa de aquellas P_A que llevan al caso I.

C. Los principios probabilísticos que fundamentan el teorema H no niegan por tanto un comportamiento cuasi-periódico de los modelos aislados; más bien casi demandan que en un tiempo suficientemente largo H regresará una y otra vez a valores considerablemente grandes; incluso a aquellos que son más grandes que el valor inicial.

Por lo tanto, la investigación de Zermelo no representa una contradicción entre las ecuaciones de la mecánica y los principios probabilísticos del cálculo de Boltzmann. Por el contrario, más bien muestra una sorprendente coincidencia.

5. Si seguimos a Boltzmann en este reconocimiento sin fundamento de la cuasi-periodicidad, no puede uno dejar de preguntar junto con el señor Zermelo: ¿Es posible mantener las afirmaciones B y C al mismo tiempo sin contradicción interna? Dejemos al modelo evolucionar desde un estado P_A que efectivamente pueda conducir, en el intervalo de tiempo inmediato τ hacia valores más pequeños de H . Se le da seguimiento al movimiento por un periodo ilimitado; después de un tiempo suficientemente largo la curva subirá una y otra vez a valores grandes de H , hasta el valor H_A e incluso subirá más alto. Pongamos una línea recta horizontal a la altura de H_A . Ésta coincidirá, en la ilimitada curva H , con todos los puntos que, en el transcurso de la evolución del modelo, posean el inusual valor grande de H llamado H_A . La afirmación (B): Si nos movemos hacia la derecha a partir de estos puntos de cruce durante el intervalo τ , entonces nos encontraremos “por regla general” un punto que cae más abajo en la curva. Y lo mismo ocurriría si escogemos cualquier otro valor alto H_A .

El señor Zermelo ha mostrado en detalle las consideraciones geométricas que lo han forzado a rechazar esa afirmación. Es simplemente inconcebible cómo dicha curva, a partir de sus puntos situados más arriba, deba ir “por regla general” hacia abajo. En este punto debemos conformarnos con referir estas anotaciones.

Por eso, está muy bien tener en cuenta, que ahora la discusión tiene que ver solo con esta dificultad puramente geométrica y ya no con la mecánica. En esta reducción a una duda meramente geométrica yace el peso especial de este ataque sobre los cálculos de Boltzmann. Es absolutamente necesario clarificar en qué sentido queremos mantener la afirmación en torno a la evolución de la curva H contra la duda geométrica del señor Zermelo.

6. Esto se consigue fácilmente de manera simple y natural si, siguiendo otra vez a Boltzmann, investigamos esta misma dificultad geométrica por medio de un ejemplo elemental del cálculo de probabilidades. Sean N bolas (por ejemplo 100) numeradas secuencialmente y distribuidas en dos urnas. La urna A contiene P_0 (por ejemplo 90), y por lo tanto la urna B tiene $Q_0 = (N - P_0)$ bolas. Pero no se sabe que bolas específicas se encuentran en cada urna. Además, se encuentran en una bolsa N cartas de lotería con los números $1 - N$. Cada una unidad de tiempo se saca una carta y se regresa a su lugar. Cada vez que se saca un número, la bola que tiene ese número salta de la urna en la que se encuentra hacia la otra urna, y permanece ahí hasta que no vuelva a salir su número.

Siempre será más probable que cada una de las bolas llamadas se encuentre en la urna más llena, y no en la más vacía. Por eso, en tanto que la urna A siga estando más llena que la urna B , con cada una de las siguientes extracciones, por regla general la urna A se estará vaciando hacia la B , y solo excepcionalmente saldrá una bola de B .

Ilustración gráfica: En el eje de las abscisas se marcan de manera equidistante los tiempos de extracción de un número. En la z -ésima marca habrá un punto con altura

$$\Delta_z = |P_z - Q_z|$$

(P_z y Q_z son los contenidos de las urnas después de la z -ésima extracción, Δ_z el valor absoluto de su diferencia). Se obtiene así una secuencia de puntos. Cada punto de esta secuencia se encuentra siempre dos unidades más abajo o dos unidades más arriba que el inmediato anterior. Un tercer caso es imposible. El primer punto $\Delta_0 = 80$ se encuentra relativamente alto. Si Δ_z tiene un valor aún alto, entonces por regla general Δ_{z+1} se encontrará más abajo. La relación de probabilidad de que vaya hacia arriba o vaya hacia abajo se comporta como

$$(N + \Delta_z) / 2N : (N - \Delta_z) / 2N \quad (6)$$

La curva Δ muestra por tanto, al principio, una decidida tendencia a ir hacia abajo, y solo de vez en cuando irá uno o más pasos hacia arriba otra vez. Si ya ha descendido lo suficiente (los contenidos de las urnas ya no son significativamente diferentes), entonces ya esos resultados “erróneos” del sorteo se hacen más frecuentes: el movimiento cuesta abajo se suavizará. La probabilidad de una u otra secuencia que lleve otra vez el valor Δ hacia un valor notorio o mayor es pequeña. Pero incluso para aquella secuencia de extracciones que pusiera las N bolas en una urna, la probabilidad es diferente de cero. Por medio de una continuación prolongada de las extracciones de números podemos lograr que la no aparición de estas “jorobas” altas y máximas se vuelva tan improbable como se quiera. Las extracciones pueden continuar por tanto tiempo, hasta que aparezca la máxima altura N . Entonces, esta curva Δ se mantendrá predominantemente cerca de cero, solo rara vez se elevará notoriamente y solo de manera excepcional lo hará de manera más marcada.

Una línea recta a la altura de 80 reúne todos los puntos de la curva que corresponden a contenidos de las urnas de 90, 10 para el siguiente sorteo. Por lo tanto, uno apostaría (9 a 1) que en cualquier de esos puntos el siguiente paso nos llevaría de 80 a 78. Y uno afirmaría esto para cada una de las líneas horizontales considerablemente altas. Por otro lado, de manera natural surge la siguiente idea: Si una de esas líneas se cruza en un punto con la “curva” 10,000 veces en la pendiente derecha (yendo cuesta abajo) de una joroba, entonces, del mismo modo, con la misma frecuencia debe cruzarse en un punto en la pendiente izquierda (yendo cuesta arriba) de una joroba. Esto es porque para poder salir por la derecha de una joroba, siempre debe haber estado primero a la izquierda de la misma. ¿No tendría entonces uno que cuidarse de afirmar que en el siguiente paso “por regla general” se va hacia abajo!?

Obviamente, la contradicción aparente entre las consideraciones probabilísticas directas y esta consideración geométrica, desaparece tan pronto como uno toma en cuenta la frecuencia extraordinaria de estar en un máximo (¡y nos referimos a puntos máximos!) que en cada valor alto se observa.

En la altura N hay, obviamente, solamente máximos; concretamente la secuencia: $(N - 2) \rightarrow (N) \rightarrow (N - 2)$. En la altura $\Delta = 0$ hay solo mínimos; concretamente la secuencia: $2 \rightarrow 0 \rightarrow 2$. Para cualquier otra altura hay cuatro opciones:

$$\alpha) (\Delta - 2) \rightarrow \Delta \rightarrow (\Delta - 2); \quad \beta) (\Delta - 2) \rightarrow \Delta \rightarrow (\Delta + 2);$$

$$\gamma) (\Delta + 2) \rightarrow \Delta \rightarrow (\Delta - 2); \quad \delta) (\Delta - 2) \rightarrow \Delta \rightarrow (\Delta + 2);$$

Sus frecuencias relativas se calculan fácilmente como:

$$\alpha:\beta:\delta:\gamma = (N + \Delta) / (N - \Delta) : 1 : 1 : (N - \Delta) / (N + \Delta) \quad (7)$$

Esto significa que: la secuencia hacia arriba (β) y la secuencia hacia abajo (γ) son igualmente frecuentes. Para valores de Δ cercanos a N la frecuencia de los puntos máximos se dispara por mucho y la frecuencia de los puntos mínimos desaparece. (¡La curva Δ va cuesta abajo “suavemente”!)

Para poner aún más claro como debe uno imaginar el comportamiento de la “curva” Δ , se puede calcular fácilmente:

La frecuencia de ocurrencia del valor Δ con respecto al del valor $\Delta + 2$ se comporta como:

$$Z(\Delta) : Z(\Delta + 2) = N + (\Delta + 2) : N - \Delta \quad (8)$$

Otra vez, si el valor Δ es cercano a N , entonces muy rara vez la curva se moverá hasta el valor $\Delta + 2$, lo cual va de acuerdo con la afirmación de que por regla general en cada uno de los puntos de valor alto se encuentra un punto máximo. ($N = 100$; $\Delta = 96$; $Z(96) : Z(98) = 198 : 4$). En relación con la objeción de reversibilidad se debe también enfatizar la siguiente afirmación: En la evolución ilimitada de la curva Δ , el paso

$$(\Delta) \rightarrow (\Delta - 2)$$

a) es exactamente igual de probable que el paso

$$(\Delta - 2) \rightarrow (\Delta)$$

b) es mas frecuente que el paso

$$(\Delta) \rightarrow (\Delta + 2)$$

[calculado con (6) y (8)]. Dando a) satisfacción a la objeción de reversibilidad y b) manteniendo, sin embargo, la tendencia hacia la disminución de H .

En resumen podemos decir:

- I. La “curva” Δ va, por regla general, cuesta bajo, partiendo de cada uno de sus puntos colocados más alto.
- II. Este enunciado aplica –y esto suena especialmente paradójico al principio– tanto si uno recorre la curva de izquierda a derecha o de derecha a izquierda-

De manera completamente análoga, solo que de manera más general, transcurrirían las consideraciones para una curva Δ que represente el resultado total de n extracciones consecutivas en lugar de una sola.

Las afirmaciones establecidas aquí resultan mucho menos claras si uno interpola innecesariamente y al mismo tiempo arbitrariamente, la secuencia de puntos discretos por medio de una curva estable continua. En tanto que no puede haber duda sobre las afirmaciones referidas aquí sobre el crecimiento de los cocientes diferenciales, esta anotación requiere argumentos aún más extensivos si uno quiere discutir el asunto de la curva interpolada diferenciable.

7. Se puntualiza para mostrar que cada intento de interpretación cinética de las leyes de la entropía utiliza la “curva” H como puntos discretos del mismo tipo que la “curva” Δ . La definición de la cantidad H se apoya en el concepto de distribución de velocidades de las moléculas; por lo tanto en el número de moléculas en cada elemento del espacio de velocidades. Esta intervención de números enteros

hace que el curso exacto de H tenga forma escalonada: H brinca con tanta frecuencia como haya un número entero de migraciones o colisiones de por lo menos una unidad. Entretanto H corre horizontalmente.

Sin embargo, de esta curva escalonada el cálculo toma esencialmente solo una secuencia de puntos discretos: el “diferencial de tiempo dT ” del teorema cinético abarca siempre un número muy grande de colisiones en el gas. El cálculo del Teorema H se refiere a los cocientes diferenciales de esta secuencia de puntos discretos, así como las otras afirmaciones relacionadas de Boltzmann sobre la tendencia de la “curva” H en el sentido de que por regla general, de los puntos situados más arriba se va cuesta abajo.

Por lo tanto, una sencilla indicación sobre los argumentos en torno a la “curva” Δ pueden ser suficientes para determinar que:

Ni la objeción de reversibilidad, ni tampoco la objeción de recurrencia son de ningún modo apropiadas o suficientes para desaprobar la afirmación de Boltzmann de que el cociente diferencial temporal de H es, con enorme probabilidad, negativo para valores grandes de H .

A 4.1 Sobre las suposiciones físicas de la teoría de Planck de los procesos de radiación irreversibles⁴¹¹

1.

H. A. Lorentz ha mostrado, por medio de consideraciones dimensionales, qué precauciones se deben tomar si uno quiere extrapolar las Leyes de la Termodinámica (por ejemplo la afirmación de Kirchhoff sobre la universalidad de la radiación del cuerpo negro) de los cuerpos naturales a sistemas ficticios. Se esperaba que la aplicación de estas consideraciones dimensionales ofreciera una comprensión más clara sobre las suposiciones físicas que forman la base de la Teoría de Planck. De manera especial surge ahí la pregunta: ¿Cuáles son las hipótesis –independientes entre sí– que le permiten a esta teoría generar, sin ambigüedad, una distribución de energía de la radiación del cuerpo negro para cada temperatura?

2.

Presentamos antes que nada las citas textuales tomadas de las publicaciones de Planck en las que muestra la idea básica de su teoría. Nos permitiremos usar en las citas las siguientes abreviaciones para el nombre de los artículos (las publicaciones aparecen todas juntas en los *Annalen der Physik*):

A = Sobre los procesos de radiación irreversible, Bd. 1, p. 69.

B = Entropía y temperatura del calor radiante, Bd. 1, p.718.

C = Sobre la ley de la distribución de energía en el espectro normalizado, Bd. 4, p. 553.

D = Sobre los procesos de radiación irreversible, Bd. 6. p. 818.

⁴¹¹ Publicado originalmente bajo el título de *Über die physikalischen Voraussetzungen der Planck'schen Theorie der irreversiblen Strahlungsvorgänge* en *Math-Naturw. Klasse*, 114 (1905) y reproducido en Ehrenfest (1959, pp. 88-101).

(B, p. 722): «Bases físicas de la teoría. La totalidad de la teoría tratada aquí se basa en la ley de Kirchhoff que dice que en un vacío encerrado por paredes tipo espejo, en el cual se han distribuido a discreción cuerpos ponderables en un orden aleatorio, al paso del tiempo se llega a un estado estacionario de radiación del calor que está determinado completamente por un solo parámetro: la temperatura, y que particularmente no depende del número, el estado y el orden de los cuerpos ponderables. Para investigar las características del estado de la radiación estacionaria, resulta totalmente indiferente qué tipo de cuerpos son los que uno presupone se encuentran presentes en el vacío, ni tampoco si dichos cuerpos ocurren realmente en algún lugar de la naturaleza, sino solamente si su existencia y sus características son en todo caso posibles. Tan pronto como se consiga conocer una condición de radiación estacionaria para una forma y ordenamiento específico cualquiera de cuerpos emisores y receptores, esta condición no podrá ser otra que la demandada por la ley de Kirchhoff.

Ahora consideremos el caso más específico de un ordenamiento especial de cuerpos particularmente sencillos, es decir, de resonadores lineales en reposo con poco amortiguamiento y longitud de onda grande entre los cuales hay distancias suficientemente más grandes, en el cual se puede probar una condición de radiación estacionaria, pero con la introducción de una suposición especial: la hipótesis de la “radiación natural” que por sí misma debe presentar y observar de manera automática el postulado inevitable de la segunda ley de la termodinámica. Si uno parte también de la condición de que las leyes de la radiación del calor se pueden comprender totalmente en términos electromagnéticos, entonces ya no queda nada más que, fundamentándose en las leyes de Kirchhoff, identificar completamente el estado estacionario encontrado con la radiación del calor».

(D, p. 818): «El punto más importante y al mismo tiempo más difícil de esta investigación consiste en probar que existe una medida o función perfectamente determinada por la condición física respectiva de los sistemas observados, que posee la característica, con todos los procesos que ocurren en el sistema, de cambiar siempre sólo en un sentido determinado, según la definición de su signo, para

siempre crecer o decrecer. Tan pronto como se pueda dar una función como esa para el estado, aparece también la prueba de que los procesos físicos en el sistema se desarrollan unilateral e irreversiblemente y que continúan así hacia un estado final, el estado estacionario, el cual se alcanza cuando dicha función alcanza su valor máximo. Por lo tanto, el conocimiento completo de la expresión de esta función, abre también al mismo tiempo el conocimiento preciso del estado de la radiación estacionaria en su dependencia de la energía y las frecuencias de todos los rayos presentes en el sistema, y particularmente también de la distribución de la energía en cada una de las áreas, del así llamado espectro normalizado estacionario».

3.

Nos permitimos ahora una anotación a la cual regresaremos en detalle posteriormente: La conexión inequívoca entre la energía total (o temperatura) y la distribución espectral de la radiación estacionaria que se alcanza finalmente, se garantizará con las consideraciones esquematizadas aquí, siempre y cuando, en relación con la medida o función que cambia unilateralmente, se muestre lo siguiente:

1. En el modelo Planckiano, en los estados de radiación “natural” posibles, aquella función – que aquí llamaremos por brevedad Σ – solo puede aumentar o permanecer constante.

2. Con una energía total dada, Σ permanece constante temporalmente sólo cuando el estado de radiación estacionaria posea, sin ambigüedad, una cierta distribución espectral (correspondiente a la energía total).

A la afirmación (1) se llega, efectivamente, a partir de las investigaciones de Planck (similar al teorema H de Boltzmann).

Sin embargo, la afirmación (2) queda sin demostrar por su aparentemente enorme dificultad (contrario a lo que ocurre con el teorema H de Boltzmann que

culmina con la demostración del carácter único de la ley de distribución de las velocidades de Maxwell).

Trataremos de mostrar que a partir de la teoría de Planck, realmente no se puede llegar a las ecuaciones de la prueba (2): Tomando como base las ecuaciones y los cálculos de la teoría de Planck, se tendrían que considerar un número interminable de rayos, los cuales

1. poseen todos la misma energía,
2. son “naturales”
3. y estacionarios; y con ellos especialmente la función Σ ya no crece más, y sin embargo,
4. poseen una distribución espectral continua.

4.

(D, p. 819): «Yo construí una de esas funciones que cambian continuamente en un solo sentido, con una formulación matemática muy sencilla (...) consideración directa y con ella se ofrecía la prueba de la irreversibilidad de los procesos de radiación observados. Por su analogía con la conocida función de la termodinámica, le llamé a esta medida la entropía electromagnética del sistema; con todos los diferentes procesos de radiación que se observan, su valor siempre es creciente».

El resultado de nuestras reflexiones anteriores muestra una diferencia esencial entre la función de Planck Σ en su comportamiento en el modelo Planckiano y la entropía termodinámica en su comportamiento en sistemas térmicos aislados.

Un sistema térmico aislado cambia durante el tiempo que sea necesario hasta que su entropía ya no aumenta más, y el estado final, con su energía total dada, tiene una relación clara con las medidas observables (presión, temperatura, distribución espectral de la radiación del cuerpo negro, etc.). También el modelo Planckiano cambia sus estados observables el tiempo necesario hasta que la función Σ ya no

crece más. Sin embargo, al mismo tiempo hay un número interminable de posibles estados estacionarios finales diferentes en relación con las medidas observables, que poseen la misma energía total.

5.

(D, p. 819): «El valor máximo de esta entropía ocurría para el estado estacionario con la misma distribución de energía espectral que algunos años antes W. Wien, partiendo de otras hipótesis, había mostrado como la distribución de energía normal ».

Si Planck habla aquí del máximo de la función Σ , no se refiere al valor de la función Σ que el modelo, con la energía total dada, alcanza con el transcurrir del tiempo y que no quedará suscrita por la teoría; - ya que esto no queda establecido por completo con la energía total, sino que depende aún de las restantes condiciones iniciales del movimiento que difícilmente pueden ser determinadas. Sin embargo, en qué sentido se utiliza esta expresión de máximo o “máximo absoluto” de la función Σ , es algo que surge claramente de una exigencia adicional que se le asignará a esta función en el curso de los cálculos de la distribución espectral. Volveremos a hablar de este punto más adelante en detalle.

Las leyes de distribución de Wien correspondían bien con las mediciones del momento.

(D, p. 819): «Esto me llevaría a la opinión, (...) de que la expresión de la energía electromagnética introducida por definición por mí, como la única de su tipo que yo conocía en ese momento, era también la forma general de la que se deriva necesariamente que la ley de distribución de energía de Wien posee validez para todas las temperaturas y longitudes de onda».

Esta expectativa no se ha cumplido.

«Aquí la teoría fue puesta de nuevo ante la tarea de encontrar una nueva expresión para la entropía (...) que por un lado, como ya antes lo había establecido yo, creciera continuamente con los procesos de radiación observados, y por otro lado, ofreciera una distribución de energía para el estado de radiación estacionaria, que correspondiera con las mediciones establecidas».

(D, p. 821): «Para la tarea mencionada arriba he obtenido ahora una solución».

6.

Podemos nombrar a las funciones Σ anterior y nueva como Σ_I y Σ_{II} . Sin embargo, todas nuestras anotaciones anteriores se refieren de la misma manera a Σ_I como a Σ_{II} .

En el artículo A, Planck había introducido, por definición, la función Σ_I . En el artículo C, sobre la base de ciertas hipótesis en torno a la “igualdad de probabilidades” de los diferentes estados electromagnéticos y sobre la base de la suposición de que la energía de radiación de los diferentes colores existe en pequeñas partículas de energía de tamaño fijo, se deriva la función Σ_{II} como expresión de la entropía. Esta función derivada así se introduce en el artículo D de la misma manera como se hizo con la función Σ_I en el artículo A.

Primeramente evitaremos el artículo C y respetaremos la introducción de Σ_I , así como de Σ_{II} , como meras definiciones. Surgirá entonces por sí mismo la formulación del problema del artículo C como necesidad inevitable y nos conducirá a una discusión de dicho artículo. Sin embargo, si nos abstenemos provisionalmente del artículo C, podemos decir: A y D muestran que fundamentándonos en las ecuaciones y los cálculos de la teoría, tanto Σ_I como Σ_{II} sólo pueden aumentar o permanecer constantes. Cuál de estas dos medidas se debe considerar como la entropía del sistema, si es que acaso una de ellas lo es – eso no se puede establecer con los trabajos A y D.

7.

Ahora vamos a la prueba de las afirmaciones establecidas arriba en el N°. 3. Hay una consideración dimensional hecha por A. H. Lorentz que se ha usado de manera mucho más general.

Existe dentro del modelo Planckiano un estado de radiación Z_I – osciladores lineales con absorción pura de radiación dentro de una cubierta reflectora perfecta. De ese estado se pueden establecer las siguientes observaciones en términos de la teoría Planckiana:

1. Es radiación “natural” (hipótesis del desorden).
2. Es radiación estacionaria en la que particularmente Σ_I y Σ_{II} ya no aumentan temporalmente.
3. La energía total es E_I .
4. La intensidad de la radiación es Δ_I .
5. La distribución de energía espectral es $s_I = \varphi(\lambda)$.

Este estado de radiación estacionaria Z_I consiste de varios campos rápidamente cambiantes y oscilaciones de todos los resonadores. Estos procesos dependen

- a) de las ecuaciones de Maxwell;
- b) de las condiciones frontera del espejo circundante;
- c) de las ecuaciones de oscilación de los resonadores.

Los tres grupos de ecuaciones son lineales y homogéneas en la intensidad eléctrica (E), la intensidad magnética (H) y el vector de oscilación (f) de los resonadores y en sus derivadas espaciales y temporales.

Por lo tanto, si una serie de procesos satisface estas ecuaciones, entonces puede uno enseguida derivar un conjunto infinito de series de procesos que también satisfagan las ecuaciones: Uno puede aumentar C , H y f en relación 1: m^2 , donde m^2 es un factor constante en tiempo y espacio y que puede tener cualquier valor (en lo que sigue supondremos que m^2 no es muy grande, para que no tengamos que probar primero que todos los cálculos de la teoría de Planck aplican también para la nueva serie de procesos).

Los nuevos procesos

$$C'(x, y, z, t) = m^2 C(x, y, z, t),$$

$$H'(x, y, z, t) = m^2 H(x, y, z, t).$$

$$f_i'(t) = m^2 f_i(t)$$

satisfacen otra vez todas las ecuaciones; porque el factor m^2 queda fuera por la homogeneidad de las ecuaciones. Demos ahora a m^2 un valor fijo.

Pasamos así de un estado de radiación Z_I a uno nuevo Z_I' . Para este nuevo estado aplica que:

1. La radiación es de nuevo “radiación natural”;
2. y estacionaria (en especial tampoco aquí las cantidades Σ_I y Σ_{II} aumentan con el transcurrir del tiempo).

Sin embargo:

3. La energía total resulta ser $E_1' = m^4 E_1$;
4. la intensidad de la radiación $\Delta_1' = m^4 \Delta_1$;
5. la distribución de energía espectral es $s_1' = m^4 \varphi(\lambda)$.

Antes de que saquemos conclusiones de estos resultados, consideremos un tercer y último estado de radiación Z_2 ; el cuál es:

1. Radiación “natural”;
2. estacionaria –
3. también en relación con Σ_I y Σ_{II} .

Que nos lleva a

4. La intensidad de la radiación Δ_2 es tan grande como en el estado de radiación Z_1' , por consiguiente $\Delta_2 = \Delta_1' = m^4 \Delta_1$;
5. y posee la distribución de energía sobre el espectro $s_2 = \phi(\lambda)$, que según la Teoría Planckiana le corresponda la radiación con intensidad Δ_2 .

Si ahora comparamos los estados de radiación Z_2 y Z_1' , vemos que: Ambos son naturales, ambos estacionarios (también en relación con Σ_I y Σ_{II}), también la intensidad de la radiación es la misma para ambos; sin embargo las distribuciones de energía son:

$$s_1' = m^4 \varphi(\lambda) \quad \text{y} \quad s_2 = \phi(\lambda).$$

Ahora hay dos posibilidades:

a) Todos los estados de radiación estacionaria finales pertenecientes a una misma intensidad de radiación dada, poseen, de acuerdo con la teoría Planckiana, una distribución espectral claramente determinada; entonces como $\Delta_2 = \Delta_1'$ tenemos que: $s_2 = s_1'$, o sea que $m^4 \varphi(\lambda) = \phi(\lambda)$. Estas suposiciones contradicen las leyes conocidas de la radiación del cuerpo negro: porque entonces tendrían $\varphi(\lambda)$ y $\phi(\lambda)$ sus máximos, por ejemplo, con la misma longitud de onda λ_m . Sin embargo, por otro lado, les correspondería una intensidad de radiación (y por lo tanto temperatura) diferente: Δ_1 para $\varphi(\lambda)$, $\Delta_2 = m^4 \Delta_1$ para $\phi(\lambda)$.

b) O: Si uno impone solamente las condiciones (1) y (2) para la radiación final, entonces para una intensidad de radiación dada, el modelo Planckiano no ofrece una distribución espectral única.

Eso fue justamente lo que establecimos en el N°. 3.

8.

Así es que para que la teoría Planckiana ofrezca un resultado sin ambigüedad, será necesario que agreguemos un requisito independiente más, adicional a los (1) y (2) ya establecidos antes. No toda radiación “natural” y estacionaria (con Σ_I y Σ_{II} sin crecer más) será reconocida como radiación de cuerpo negro, sino solo aquella que satisfaga un tercer requisito.

Este nuevo requisito será introducido expresamente en el transcurso de la investigación.

(A, p. 110): «La función Σ_I del sistema no solo no debe cambiar más para los verdaderos procesos del sistema, sino que también debe desaparecer la variación de Σ_I “para cada cambio infinitamente pequeño del estado del sistema”, que sea compatible con la energía dada».

En la segunda versión de la teoría se pide lo mismo en relación con la función Σ_{II} (D, p. 829).

Tan pronto como se pruebe que alguna de las dos funciones Σ , por ejemplo Σ_{II} , es en verdad “la” entropía del sistema, el nuevo requisito deja de ser independiente – porque la entropía tenía, sin embargo, la característica de que ella – si uno deja de lado el caso del falso equilibrio – conduce al sistema, por mucho tiempo, hacia otros cambios, hasta que ha alcanzado sus máximos “absolutos” tanto verdaderos como virtuales (que son compatibles con el contenido de energía y las condiciones del sistemas). En tanto que Σ_I y Σ_{II} solamente puedan aumentar o permanecer constantes, igualmente el tercer requisito permanecerá independiente de

uno de los dos primeros requisitos, que los estados de radiación naturales y estacionarios del modelo Planckiano no puedan satisfacer “libremente”. Para todo estado de radiación para el cual se satisfagan al mismo tiempo los tres requisitos, existen, como hemos visto, un número infinito de estados que satisfacen solamente los primeros dos y que contradicen el tercero.

Esto nos llevará necesariamente al problema que Planck abordó en su artículo C: ¿Cuál de las cantidades Σ , que siempre encontramos incrementándose o permaneciendo constantes, es “la” entropía del sistema?

9.

Sin embargo, queremos discutir primero brevemente una objeción que se puede presentar contra el uso de la consideración dimensional: Su aplicación a las ecuaciones y cálculos a partir de los fundamentos de la teoría Planckiana casi no se pone en duda. Las ecuaciones de Planck para los resonadores no son las expresiones exactas de lo que realmente pasa en el resonador y sus alrededores; si uno sigue estos procedimientos con más detenimiento, ya no serían posibles los movimientos a partir de nuestra consideración de igual probabilidad – por ejemplo solo habría una única solución a la vez a partir de la teoría Planckiana.

Conviene proseguir con estos pensamientos; es decir, se podría mostrar, que con cálculos más completos de lo que pasa en los resonadores, la función Σ_{II}

1. solo puede aumentar o permanecer constante y
2. solo puede permanecer constante cuando ha alcanzado el máximo valor “absoluto”.

Si se pudiera llevar adelante esta idea con éxito, entonces se estaría consiguiendo para el modelo de Planck, lo mismo que consigue el Teorema H de Boltzmann para gases monoatómicos. Lo que prueba este teorema es que:

1. La función H puede solo aumentar o permanecer constante;

2. solo permanece constante, cuando rigen las leyes de distribución de Maxwell (que se distinguen igualmente por el hecho de que H posee al mismo tiempo su máximo absoluto).

10.

La objeción sugerida arriba contra la validez de la consideración dimensional aplica al modelo Planckiano y da solo la representación a partir de las ecuaciones generales.

Otra continuación de la teoría es sugerida por Planck en (D, p. 820).

«Puede parecer extraño a primera vista que puedan existir no sólo una, sino varias funciones de estado que posean todas la característica de aumentar su valor continuamente en los procesos de radiación observados. Pero esta circunstancia se explica por sí misma a partir del hecho, repetidamente expresado por mí, de que los procesos de radiación considerados aquí no son los más generales de los que se pueden encontrar en la naturaleza. Si estuviéramos en condición de llevar a cabo un análisis completo, correspondiente a los procesos de radiación natural más generales posibles, entonces probablemente encontraríamos que solo hay una función que posee las características de la entropía bajo todas las circunstancias. Sin embargo, con el estado actual de nuestro conocimiento, no parece ser útil este camino para determinar la expresión de la entropía».

«Sin embargo, si depende de la prueba de irreversibilidad de los procesos observados, entonces, tal parece que es suficiente si también sólo se define una función de estado que posea la característica de crecer continuamente en el tiempo».

Para probar que existe un estado estacionario final, sería en general suficiente el conocimiento de una función cualquiera de esas. Sin embargo, para ver que con la energía dada ocurre un solo estado (con una distribución espectral específica), y para

ver como está constituido, debe probarse entonces que esta función ahora ya no cambia cuando se alcanza este estado.

11.

Por lo visto, ya de por sí la transferencia de este segundo aspecto del teorema H a la termodinámica de la radiación presenta enormes dificultades, sin embargo por otro lado resulta esencial la prueba de si una de las dos funciones Σ es “la” entropía del sistema y –si así es- cuál de las dos, por lo que Planck ha abordado este problema desde otro punto de vista en su artículo C.

Después se había mostrado por medio del teorema H que la misma función H se comporta como la entropía y que su expresión funcional en cada caso, donde la entropía de los cuerpos estaría definida por completo por la termodinámica, coincide con esta entropía, más aún Boltzmann consiguió probar que el valor de H para el estado estacionario final posee un valor máximo característico. Esta característica máxima se sustenta con una hipótesis específica sobre la igualdad combinatoria de los estados; o expresado de otra manera: con la hipótesis de que los diferentes estados del sistema deben ser considerados como igualmente probables.

El artículo C es el intento de transferir esta derivación combinatoria de la entropía a la termodinámica de la radiación. Queremos constatar que este artículo se fundamenta sustancialmente en dos hipótesis:

1. La hipótesis sobre la igualdad probabilística en la distribución de energía sobre los resonadores.

2. La hipótesis de que la energía de la radiación de los diferentes colores está compuesta de pequeñas partículas de energía de valor:

$$E_v = \nu \times 6.55 \times 10^{-27} \text{ erg-sec,}$$

donde ν es la frecuencia del color correspondiente.

Esperamos regresar en un momento en detalle al artículo C. La hipótesis (1) tiene su análogo en la teoría de Boltzmann. La hipótesis (2), que por lo visto en su forma actual se introduce solo de manera formal, requiere entonces de otra reducción. Hasta donde yo puedo ver, no existe para ella una analogía en la teoría de Boltzmann.

12.

Fue nuestro deseo darle un vistazo de una manera distinta y con ayuda de las consideraciones dimensionales de H. A. Lorentz, a las ideas desarrolladas por Planck, y llegar entonces por otros caminos a la presentación de aquellos problemas que las inacabadas partículas de Planck presentan, y que se desarrollan hasta un cierto grado en el artículo C. Nos parece que una consideración de la influencia cinética molecular y de cómo utiliza la teoría de Lorentz sobre la absorción y la emisión de radiación de calor de onda larga, difícilmente se podrá evitar si se desea alcanzar una clara conexión entre la temperatura y la radiación del cuerpo negro.

Esperamos regresar a este punto al discutir la hipótesis del artículo C.

A 4.2 Sobre la teoría de la radiación de Planck⁴¹²

Con respecto a la aparición de las “Lecciones sobre la Teoría de la Radiación del Calor” del Profesor Planck quiero tomarme la libertad de presentar ordenadamente algunas observaciones especiales sobre la Teoría de la Radiación de Planck tomadas de un trabajo que aparecerá posteriormente. La fundamentación más completa aparecerá en ese trabajo.

& 1. El Sr. Planck desarrolla en su libro (Planck, 100) el siguiente plan de su teoría: La ley de Kirchhoff sobre la universalidad de la radiación del cuerpo negro se puede extrapolar también a sistemas ficticios. Como tal, el Sr. Planck elige el siguiente modelo: una cubierta reflectora que encierra uno o varios resonadores. La naturaleza de los resonadores se define solo por su ecuación de oscilación lineal y homogénea. Poseen solo radiación, pero no amortiguamiento por fricción. “Tan pronto como se tenga éxito en demostrar un cierto estado de radiación en el vacío de la región con un cierto arreglo arbitrario de sistemas emisores y receptores, que se distinga por poseer una estabilidad absoluta, entonces dicha condición no será otra sino la de la radiación negra”. El Sr. Planck hace cálculos sobre la manera en que la presencia de dichos resonadores, inicialmente puestos en el modelo, cambia la radiación. A pesar de la linealidad de todas las ecuaciones consideradas básicas, estos cálculos presentan enormes dificultades y sus limitaciones inherentes complican un primer análisis general. Nos podemos permitir entonces, esquematizar cómo de alguna manera puede uno conectar sus métodos con los de Rayleigh y Jeans para hacer al menos plausibles la mitad más significativa de los resultados obtenidos por el Sr. Planck. El resultado se puede formular posiblemente de la siguiente manera (véase la parte final del libro):

1. La composición de colores de la radiación, que uno introduce al principio en el modelo, no se ve influenciada por la presencia arbitraria de tantos

⁴¹² Publicado originalmente bajo el título de *Zur Planckschen Strahlungstheorie* en *Physikalische Zeitschrift*, 7, 528-532 (1906) y reproducido en Ehrenfest (1959, pp. 120-124).

resonadores Planckianos como se quiera, sino que se preserva de manera continua.

2. Bajo el efecto de la absorción y la emisión de los osciladores, al final se obtiene un estado de radiación estacionaria, en el que las intensidades y polarizaciones de las radiaciones de los diferentes colores se compensan mutuamente en magnitud y dirección.

Resumiendo: Una radiación encerrada en el modelo Planckiano puede, con el paso del tiempo, desordenarse – ciertamente no se hace más negra. Para la siguiente argumentación, adaptamos esta formulación: Los resonadores dentro de la cubierta reflectora se comportan igual que una cubierta reflectora vacía que refleja en forma difusa en lugares específicos.

El hecho de que los resonadores Planckianos tienen un efecto de dispersión sobre la radiación a la manera de una reflexión difusa – sólo tal vez con distinta rapidez – es algo que admitiremos primero sin ningún cálculo. Ya que se trata directamente de la radiación que se hace más negra, resulta especialmente significativa la primera parte de los resultados Planckianos. Nosotros queremos servirnos de las conclusiones que el Sr. Planck ha obtenido con otros propósitos: Una cubierta con reflexión perfecta o difusa encierra solamente éter puro. Por lo tanto, todo proceso de radiación dentro de esta cubierta es simplemente una cierta superposición de oscilaciones naturales de la cavidad. Sus amplitudes (y fases) permanecen constantes en tanto que el sistema permanezca aislado. “No hay mas que...una tendencia hacia un balance de las partes de energía que caen en las diferentes oscilaciones parciales” (Planck, 175). Estos resultados se pueden transferir fácilmente del modelo Planckiano. En tanto que los mencionados osciladores se definen por nada más que las ecuaciones diferenciales, lineales y homogéneas que el Sr. Planck les asigna, serán en esencia idénticos a pequeños palitos dieléctricos. Por lo tanto, cada estado de movimiento de los modelos Planckianos es otra vez una superposición de las oscilaciones naturales de este sistema más complejo. Y entonces no hay más que una tendencia hacia un balance de las partes de energía que caen en las diferentes oscilaciones parciales. Este resultado encontrado por el Sr. Planck es

tanto más significativo en tanto que la primera impresión más bien lo refutaría: Un resonador Planckiano respondería por medio de su absorción de radiación de ondas de períodos suficientemente cercanos a sus períodos de oscilación natural. Se esperaría entonces que una multitud de resonadores que siguen de cerca las frecuencias naturales de oscilación, extendiéndose sobre todo el espectro, fueran capaces de transformar gradualmente una radiación inicialmente monocromática en radiación con una distribución espectral continua.

& 2. Si uno le asigna una cierta entropía a cada estado de movimiento del modelo, entonces escogiendo adecuadamente la expresión para la entropía, el resultado Planckiano se puede formular así: La entropía alcance un valor que ya no puede sobrepasar en tanto el modelo se mantenga aislado. Sin embargo, este límite superior depende no solo de la energía total, sino también de la distribución espectral inicial de la radiación encerrada. Una analogía con la teoría cinética de los gases nos puede dar una visión más profunda. Definimos de manera peculiar un gas idealizado: las moléculas de estos gases tienen un comportamiento completamente independiente. Por lo tanto, solo golpean en las paredes y son “partículas” de empuje por igual. Estas “partículas” son como bolas elásticas de tamaño molecular distribuidas por el espacio con centros fijos absolutos. Con cada impacto, las moléculas del gas mantienen su velocidad absoluta (energía); sin embargo, su dirección de movimiento cambia. Para este modelo se puede construir una analogía completa del teorema H. Si aceptamos por el momento sin reservas el teorema H, entonces se muestra que: Una distorsión inicial en la distribución de densidad y en las direcciones de las velocidades se reajustará a sí misma. De la tendencia a la igualación de la cantidad de energía que porta cada molécula individual, naturalmente no se puede decir nada. Probablemente la cantidad H crece hasta un valor, que ya no puede sobrepasar, en tanto el modelo se mantenga aislado, de acuerdo con la disminución parcial del orden inicial. Sin embargo, en ambos modelos la entropía no acepta su valor máximo “absoluto” para la energía total dada. Lo tomaría si en aquel modelo de la radiación negra, buscara tener una distribución de velocidades maxwelliana, para lo cual no existe posibilidad. Por lo tanto, la radiación no es capaz en general, en un modelo aislado, de alcanzar un estado “que se

caracterice por una estabilidad absoluta”. En el modelo Planckiano hay infinitas formas de radiación no negra perfectamente estables. Esto se puede mostrar de manera especialmente simple con la ayuda de un método dimensional. Si ahora el Sr. Planck ha adoptado explícitamente la exigencia de “estabilidad absoluta” en la presentación actual de los fundamentos de su teoría de los resonadores, surge de manera natural la pregunta: ¿Cómo se produce esta estabilidad absoluta, o también cómo se le reconoce?

& 3. Le debemos al Sr. Planck una segunda teoría de la radiación del cuerpo negro, que si he entendido correctamente es independiente físicamente de la teoría de los resonadores, y que ya ha mostrado un resultado extraordinariamente bello: la muy precisa definición de la constante de Boltzmann k ($3/2 kT =$ la mitad de la energía cinética de una molécula con la temperatura T). Por brevedad, de aquí en adelante a esta teoría le llamaremos “teoría compleja”. En ella se permite una representación que corresponde más a los métodos de Rayleigh y Jeans. Las amplitudes y las fases de las oscilaciones naturales de un espacio rodeado por una cubierta reflectora deben considerarse, en el mismo sentido, como independientes entre sí como las velocidades de las moléculas de un gas libres de fuerzas. Esta observación da lugar a transferir a estos sistemas, la definición cinética que Boltzmann ha dado para la entropía de mezclas de gases que no se encuentran en equilibrio. La enorme cantidad de moléculas de algún tipo han de corresponder a la enorme cantidad de modos dominante de la cavidad, cuyas frecuencias se encuentran entre ν y $\nu + d\nu$. Por lo tanto, la entropía de una radiación encerrada por la cubierta reflectora estaría dada por

$$S = konst. - k \int_0^{\infty} d\nu N(\nu) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\nu, f, g) \lg F(\nu, f, g) df dg \quad (1)$$

Aquí, $N(\nu)d\nu$ representa el número total de todas las oscilaciones naturales cuyas frecuencias caen entre ν y $\nu + d\nu$; $N(\nu)d\nu F(f, g, \nu) df dg$ el valor instantáneo debajo de ellas para los valores instantáneos de la elongación f y el momento g que caen entre f

y $f + df$ y entre g y $g + dg$. Si designamos como ϵ_v a la energía total de una oscilación natural como esa en ese estado, tenemos

$$\epsilon_v = \frac{\alpha_v}{2} f^2 + \frac{\beta_v}{2} f^2 \quad (2)$$

por lo tanto

$$g_v = \frac{\partial \epsilon_v}{\partial f} \quad (3)$$

Por lo tanto, la hipótesis básica de la teoría cinética compleja es ésta: Si uno comunica al sistema observado, a través de algún medios disponible en la naturaleza, una cierta cantidad de energía, y aísla el sistema, después de que se alcance el equilibrio, de la misma manera prevalecerá en equilibrio aquella función de distribución F que la dá a la función S el máximo valor que es en general posible considerando todos los estados finales con las restricciones dadas. (A esta forma especial de la función F le llamaremos “distribución límite”). Esta hipótesis básica de la teoría de Boltzmann es igual a la de Planck. Correspondientemente, se tienen que plantear todas las restricciones en la forma de relaciones que deben ser suficientes para F y las variaciones de F que considerando estas relaciones llevan a un máximo relativo de S . Considerando estas condiciones, se tiene que:

$$\text{I.} \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \int F(v, f, g) df dg = I$$

Entonces, de acuerdo con la definición de F :

$$N(v)dv = N(v)dv \int_{-\infty}^{+\infty} \int F(v, f, g) df dg$$

$$\text{II.} \quad \int_0^{\infty} dv N(v) \int_{-\infty}^{+\infty} \int \epsilon_v F(v, f, g) df dg = E,$$

donde E es la energía de la radiación encerrada en la cavidad, cuyo valor total es fijo. –Sobre la intervención de las otras condiciones se argumentará más adelante-. Si uno determina el máximo relativo de S , con consideración exclusiva de las relaciones I y II, entonces los cálculos se desarrollan igual que en el caso de una mezcla de gas. Por lo tanto, se recibe como función límite la bien conocida distribución de Maxwell-Boltzmann, y como consecuencia se tiene la afirmación de que el contenido de energía media para los modos de oscilación dominantes de cada intervalo de frecuencias es el mismo. Si uno aplica el mismo método a un sistema que consiste de éter y moléculas, cosa que aquí no se desarrollará, resulta que: este contenido de energía media sería diferente al contenido de energía media de las moléculas. Sin embargo, de ahí se concluiría que al final, como Rayleigh y Jeans lo han mostrado evaluando $N(\nu)$ para una región cúbica, se obtendría la siguiente ecuación espectral para la radiación del cuerpo negro

$$\varphi(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2 kT}{c^3} \quad (4)$$

donde c es la velocidad de la luz y $3/2 kT$ la energía cinética media de una molécula a la temperatura T . Esta fórmula sólo puede estar en armonía con la observación para ondas largas y temperaturas altas. Sin embargo se observa que

1. posee la forma demandada por la ley de desplazamiento de Wien

$$\varphi(\nu, T) = \nu^3 f\left(\frac{T}{\nu}\right); \quad (5)$$

2. lleva, de la misma manera que la ecuación espectral de Planck, a una determinación exacta de la constante k de Boltzmann, en tanto uno las compare en su región de validez con la observación.

Para frecuencias más altas se debe rechazar la ecuación espectral, ya que para $\nu \rightarrow \infty$ lleva a intensidades infinitamente grandes. La pregunta que surge es: ¿Por qué medios evita esta dificultad la “teoría compleja” de Planck?

& 4. Antes que nada, en general se tiene que tomar en consideración la intervención de otros factores limitantes además de I y II. El hecho de que esos factores pueden fundamentarse físicamente, se muestra con la siguiente observación, que presento sólo como ejemplificación. Supongamos que en la naturaleza toda excitación de radiación ocurre exclusivamente a través de la mediación de electrones, y que estos electrones poseen con certeza alguna estructura. Esta estructura especial, que quizás consiste simplemente en un diámetro fijo de los electrones, puede ser causa en principio de que cualquiera de las excitaciones concebibles de los modos dominantes de nuestra cavidad no se pueda producir por medios naturales. Hasta ahora, no se ha tenido éxito en la derivación de tales restricciones a partir de alguna hipótesis física.

Sin embargo, por medio de una presentación arbitraria, también se puede calcular sólo una única relación para $F(v,f,g)$ como función límite.

Se establece, por ejemplo, una tercera relación para F en la forma todavía muy especial:

$$\text{III.} \quad \int_0^{\infty} dv N(v) \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(v, f, g) F(v, f, g) df dg = A,$$

donde Φ es una función arbitraria seleccionada y A es una constante. El cálculo para determinar la distribución límite aparece como:

$$\delta H + \rho \delta I + \sigma \delta II + \tau \delta III = 0, \quad (6)$$

donde ρ, σ, τ son multiplicadores que se determinan a sí mismos a partir de I, II y III. El cálculo arroja que:

$$\lg F_{(v,f,g)} + I + \rho + \sigma \varepsilon_v + \tau \Phi(v, f, g) = 0$$

o

$$F(v, f, g) = e^{-[1 + \rho + \sigma \varepsilon_v + \tau \Phi(v, f, g)]} \quad (7)$$

y dependientes entonces completamente del valor arbitrario de Φ .

Cualquier distribución espectral deseada se puede calcular de muchas maneras diferentes agregando una relación de la forma III apropiada. Y eso no aplica para la F misma, sino solamente para el valor de

$$N(\nu) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \epsilon_{\nu} F(\nu, f, g) df dg \quad (8)$$

para cada valor de ν . De ahí que el camino de la observación a una forma empírica para la distribución espectral y de ahí a la presentación de una de esas condiciones de variación (III) no es menos que claro, de manera que la derivación de una ecuación espectral a partir primero de una de las condiciones de variación es válida por el momento como una derivación teórica, donde se pueda justificar de alguna forma física la elección de la condición de variación. En los casos donde Boltzmann utilizó los métodos de la “teoría compleja”, la discusión física de los términos de variación usados eran por supuesto centrales en la investigación.

& 5. Se puede desear conservar particularmente la ecuación espectral dada por el Sr. Planck:

$$\varphi(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{I}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

ya que, como es conocido, concuerda muy bien con la observación. Después de lo discutido arriba, se podría seleccionar otra vez una forma diferente para las condiciones de variación adjuntas. Queremos ahora seleccionar la escogida por el Sr. Planck. En la terminología que hemos usado aquí sería expresado más o menos así: Las oscilaciones naturales de frecuencia ν pueden poseer solamente cantidades de energía ϵ_{ν} , que son múltiplos enteros de los cuantos de energía

$$\epsilon_{\nu}^0 = h \nu = 6.548 \times 10^{-27} \nu \text{ erg} \quad (9)$$

como si para cada frecuencia ν , la energía de oscilación consistiera de átomos de energía con un valor que corresponde al número

$$e_{\nu}^0 = 6.548 \times 10^{-27} \nu \text{ erg}$$

Está permitido presentar esta condición en su forma usual en la mecánica estadística. Yo no he podido ponerla en completa concordancia con la formulación análoga que el Sr. Planck ofrece en la p. 150 de sus “Lecciones”. Introducimos para la oscilación natural de frecuencia ν un plano de imagen f - g . Cada oscilación natural tiene un punto de la imagen que corresponde con su estado de oscilación instantáneo. Entonces, esa hipótesis atómica de la energía significa que: El punto de la imagen de una oscilación natural de frecuencia ν no puede tomar cualquier posición en la superficie; solo puede caer en ciertas curvas – específicamente en las elipses

$$(\epsilon_{\nu} =) \frac{\alpha_{\nu}}{2} f^2 + \frac{I}{2\beta_{\nu}} g^2 = m \cdot h\nu \quad (10)$$

donde m toma los valores sucesivos de los números enteros hasta un valor tal que $m h\nu$ excedería el valor dado del total de la energía de radiación con un incremento adicional de m .

Después de esta excursión regresamos de nuevo a la pregunta al final del punto 3: ¿Por qué medios la teoría de Planck logra hacer inocuos los muchos tonos superiores ultravioletas de la cavidad, en donde la energía no se dispara como con Rayleigh y Jeans, sino que más bien la curva espectral decrece muy rápidamente después del ultravioleta? Ahora podemos reconocer fácilmente de que manera el punto de partida (9) para los átomos de energía puede funcionar en este sentido: Por la ecuación (9) los átomos de energía de Planck crecen al crecer ν indefinidamente. Este hecho no es por supuesto en sí mismo una objeción física importante; ya que como lo muestra una estimación basada en las cifras dadas por el Sr. Planck, e_{ν}^0 tiene un valor, en la región de la radiación observada, del orden de magnitud de la mitad de la energía cinética de las moléculas para $T = 1000$. Sin embargo, parece ser significativo para una comparación de la teoría de Planck con la de Rayleigh-Jeans y con el método ofrecido por H. A. Lorentz.

A 4.3 ¿Qué aspectos de la hipótesis del cuanto de luz juegan un papel esencial en la teoría de la radiación térmica?⁴¹³

La hipótesis del cuanto de luz se ha aplicado últimamente a un círculo rápidamente creciente de preguntas que solo tienen una vaga conexión con el problema de la radiación del calor. El destino de esta hipótesis se decidirá muy probablemente con los resultados experimentales justamente en las nuevas áreas de aplicación. Sin embargo, por el momento aún no hay una clara decisión sobre este asunto. Por lo tanto, me parece que sería valioso poner a consideración una serie de reflexiones de la siguiente manera: *Existen algunos aspectos sobre la hipótesis del cuanto de luz que, en vista de las propiedades de la radiación negra, deben ser considerados como ciertos.* Nos daría más luz saber, en qué medida otros aspectos típicos de la hipótesis del cuanto de luz, se pueden considerar como modificables desde el punto de vista de la radiación del calor.

En el & 14 se encuentra un resumen de los resultados, así como la formulación de otras preguntas.

& 1. Resumen de las propiedades de la radiación del calor que requieren de una investigación más profunda.

I. Con compresión adiabática reversible de radiación (desordenada) dentro de un compartimiento completamente reflector, su entropía no cambia, independientemente de que la radiación sea negra o no.

II. *La ley de desplazamiento.* La distribución espectral tiene la siguiente forma general:

⁴¹³ Publicado originalmente bajo el título de *Welche Züge der Lichtquantenhypothese spielen in der Theorie der Wärmestrahlung eine wesentliche Rolle?* en *Annalen der Physik*, 36, 91-118 (1911) y reproducido en Ehrenfest (1959, pp. 185-212). En este apéndice solamente se han traducido 7 secciones de un total de 14 que contiene el artículo original.

$$(1) \quad \rho(v, T) dv = \alpha v^3 \cdot f\left(\beta \frac{v}{T}\right) dv$$

La ley de desplazamiento en sí no limita más la forma de f .

III. *La prueba de la ecuación de Rayleigh-Jeans para longitudes de onda muy grandes.* Ya que la fórmula

$$(2) \quad \rho(v, T) dv = \frac{8\pi k}{c^3} \cdot v^2 T$$

se comporta bien para longitudes de onda muy grandes – valores pequeños de v/T –

entonces se demandará que en la función $f\left(\beta \frac{v}{T}\right)$, al disminuir el argumento, cambie

de acuerdo con $\left(\beta \frac{v}{T}\right)^{-1}$, es decir, se debe cumplir

$$(3) \quad \lim_{\sigma \rightarrow \infty} \{\sigma \cdot f(\sigma)\} = 1$$

A esta demanda se le puede llamar “*demanda del rojo*”. La fórmula de radiación de Wien no es suficiente; se debe cumplir también este límite.

IV. *Sobre cómo evitar la catástrofe del ultravioleta de Rayleigh-Jeans.* La ecuación de Rayleigh-Jeans (2) se sabe que falla para ondas cortas: esa ecuación le permite crecer a $\rho(v, T)$ sin límite con respecto a v , en tanto que –para que la energía permanezca finita- debe ir hacia un valor nulo con rapidez mayor a v^{-1} : en la ecuación (1), $f\left(\beta \frac{v}{T}\right)$ debe de ir hacia un valor nulo –con T constante- a una razón mayor que v^{-4} al crecer v ; se debe cumplir:

$$(4) \quad \lim_{\sigma \rightarrow \infty} \{\sigma^4 \cdot f(\sigma)\} = 0$$

A esta demanda se le llamará “*demanda del violeta*”.

V. *La demanda del violeta reforzada*. Con respecto al hecho de que para valores grandes de νT , las mediciones de la radiación concuerdan con la forma de W. Wien

$$(5) \quad \rho(\nu, T) = \alpha \nu^3 e^{-\beta \frac{\nu}{T}}$$

puede uno demandar ir más allá de la ecuación (4) y establecer que solo son válidas aquellas fórmulas de radiación para las cuales $f(\sigma)$ va hacia un valor de cero, conforme crece σ , como cualquier potencia negativa de σ ; es decir, se debe cumplir

$$(6) \quad \lim_{\sigma \rightarrow \infty} \left\{ \sigma^n \cdot f(\sigma) \right\} = 0 \quad (\text{para un valor arbitrario de } n)$$

La demanda (4) puede tal vez considerarse como evidente; la ecuación (6) –la llamada “*demanda del violeta reforzada*”– se presenta como un postulado que va mucho más allá de la experiencia. Las consecuencias que resultan de (6) poseen, correspondientemente, mucha menos restricción, que las derivables de (4). (vea & 8, 9)

VI. *La demanda del violeta de Wien-Planck*. Como se sabe, la fórmula de radiación de Planck

$$(5a) \quad \rho(\nu, T) = \alpha \nu^3 \frac{1}{e^{\beta \frac{\nu}{T}} - 1}$$

tiene, para valores grandes de νT , el mismo comportamiento que la fórmula de Wien (5); o dicho de otra forma: la fórmula de Planck cumple suficientemente con al demanda para $f(\sigma)$, de que exista una cantidad L diferente de cero, tal que

$$(7) \quad \lim_{\sigma \rightarrow \infty} \left\{ \frac{f(\sigma)}{e^{-L\sigma}} \right\} = M \quad (\text{una constante diferente de cero})$$

Es metodológicamente interesante destacar directamente en la fundamentación teórica de estas dos fórmulas, los aspectos comunes que permiten que en ambas fórmulas la $f(\sigma)$ de la ecuación (7) – La “*demanda del violeta de Wien Planck*” – sea

suficiente, la cual es mucho más específica que la ecuación (6). Por lo tanto, analizaremos en el § 12 el tipo de fórmulas de radiación para las que la $f(\sigma)$ de la ecuación (7) es suficiente. – Para terminar diremos que se puede fácilmente perder de vista, por la buena correspondencia que se da para valores grandes de νT , entre lo observado y las ecuaciones (5) y (5a), que casi cualquier $f(\sigma)$ sería rechazada por no satisfacer la ecuación (7).

§ 2 . La ayuda electromagnética.

Nos valdremos del método de las oscilaciones naturales en la forma en que lo introdujeron por primera vez Rayleigh y Jeans en la teoría de la radiación del cuerpo negro. Sin embargo, se puede en cada instante, probablemente sin tener que superar cada nueva dificultad que se presente, dar paso a la terminología de los resonadores, de la cuál el mismo Planck se sirvió en sus trabajos. En relación con el desarrollo general sobre las oscilaciones electromagnéticas naturales en una cavidad, hacemos referencia a la p. 165 del libro de Planck. Ahí se encuentra la prueba del siguiente estatuto.

I. Para un cubo reflector vacío de longitud l , el número de oscilaciones electromagnéticas naturales *independientes entre sí*, cuyas frecuencias caen entre ν y $\nu + d\nu$, está dado por:

$$(8) \quad N(\nu)d\nu = \frac{8\pi^3\nu^2}{c^3} d\nu$$

Se puede demostrar sin dificultad la siguiente proposición:

II. Si empujamos, acercando entre sí, las paredes del cubo, muy lentamente haciéndolo cada vez mas pequeño, de la misma manera aumentará (a expensas del trabajo llevado a cabo contra la presión de la radiación) la energía parcial de todas las oscilaciones naturales de manera proporcional a la frecuencia ν , y por lo tanto en proporción inversa a la longitud l del cubo:

$$(9) \quad \frac{E'_{\nu'}}{\nu'} = \frac{E_{\nu}}{\nu},$$

$$(10) \quad \nu' l' = \nu l.$$

& 3. La ayuda de la teoría probabilística

Se puede caracterizar de la siguiente manera: La distribución “más probable”, con una energía total dada, de las oscilaciones naturales sobre todas las posibles rangos de excitación, esta determinada por el mismo proceso con que Boltzmann determina la distribución “más probable”, con energía total dada, de las moléculas de una mezcla gaseosa sobre todos los posibles rangos de velocidades. Las oscilaciones naturales de un rango de frecuencias $d\nu$ juegan el mismo papel que las moléculas de una sustancia.

Solamente generalizamos en un punto esencial el procedimiento de Boltzmann: por medio de la introducción de una “*función de peso*” inicialmente arbitraria. Si uno se pregunta por la probabilidad relativa de que las coordenadas $q_1 \dots q_n$ y los momentos $p_1 \dots p_n$ de las moléculas *individuales* caigan en una u otra de entre dos regiones (q, p) separadas, diremos que Boltzmann establece que esta probabilidad relativa es siempre proporcional al cociente de los “Volúmenes (q, p) ” de ambas regiones. Un análisis más preciso de esta afirmación que considera para cada molécula individual todo el espacio (q, p) con un peso independiente (q, p) muestra, como se sabe, que en muchas relaciones es más sencillo, pero que no se le puede ver por completo como única posibilidad

A la condición de excitación de una oscilación natural se le puede caracterizar por su contenido de energía y su fase. Para las oscilaciones naturales individuales todas las fases deben considerarse como iguales. La función de peso es por tanto independiente de la fase. Para la probabilidad de que una oscilación natural *individual* de frecuencia ν posea una cantidad de energía que caiga entre E y $E + dE$, obtenemos por lo tanto una expresión de la forma:

$$(11) \quad \gamma(\nu, E) d\nu.$$

En cambio, la probabilidad de que de las $N(\nu)d\nu$ oscilaciones naturales de frecuencia ν , una cantidad a_1, a_2, \dots de oscilaciones naturales caigan en las regiones de energía consecutiva dE_1, dE_2, \dots , se calcula entonces por el procedimiento de Boltzmann como:

$$(12) \quad [\gamma(\nu, E_1) \cdot dE_1]^{a_1} \cdot [\gamma(\nu, E_2) \cdot dE_2]^{a_2} \dots \frac{[N(\nu)d\nu]!}{a_1! a_2! \dots}$$

Con los métodos ya conocidos, se puede uno ayudar de la fórmula de Stirling para pasar a la representación del logaritmo de esta probabilidad con la ayuda de una integral sobre las funciones continuas. Se obtiene de esta manera:

$$(13) \quad \log W = \text{const.} + \int_0^\infty d\nu N(\nu) [\log N(\nu) - 1] + \int_0^\infty d\nu \int_0^\infty dE \cdot a(\nu, E) [\log \gamma(\nu, E)] - \int_0^\infty d\nu \int_0^\infty dE \cdot a(\nu, E) [\log a(\nu, E) - 1]$$

Con la selección de la función de peso $\gamma(\nu, E)$ obtenida de alguna manera, uno llega a la distribución “*más probable*” con una energía total dada \mathfrak{S} , si uno toma la distribución $a(\nu, E)$, que junto con las condiciones adicionales

$$(14) \quad \int_0^\infty dE \cdot a(\nu, E) = N(\nu)$$

y

$$(15) \quad \int_0^\infty d\nu \int_0^\infty dE \cdot E a(\nu, E) = \mathfrak{S}$$

la cantidad $\log W$ alcanza un máximo. Se obtiene:

$$(16) \quad a(\nu, E) = e^{\lambda(\nu)} \gamma(\nu, E) e^{-\mu E}$$

Donde $\lambda(\nu)$ y $(-\mu)$ son los multiplicadores de Lagrange de las condiciones adicionales (14) y (15).

Se puede eliminar el multiplicador $\chi(\nu)$ con ayuda de (14): Se sustituye (16) en (14). Eso da:

$$(17) \quad e^{\lambda(\nu)} \cdot \int_0^{\infty} dE \cdot \chi(\nu, E) e^{-\mu E} = N(\nu)$$

De (17) y (16) se obtiene:

$$(18) \quad a(\nu, E) = N(\nu) \frac{\chi(\nu, E) e^{-\mu E}}{\int_0^{\infty} dE \cdot \chi(\nu, E) e^{-\mu E}}$$

El multiplicador μ sería ahora expresado con ayuda de la condición adicional (15). Naturalmente puede suceder ahora que uno escoja una función concreta para $\chi(\nu, E)$ y después de sustituir (18) en (15) hacer todas las integraciones. Sin embargo, como mostraremos en & 6, para nuestros fines no necesitamos expresar μ por medio de \mathfrak{S} .
- Agregamos las siguientes observaciones para utilizarlas más adelante.

I. Con cierta selección de $\chi(\nu, E)$, μ dependerá de \mathfrak{S} - como del multiplicador de la condición adicional (15) - no de ν y E .

II. Dos funciones de peso diferentes $\chi_1(\nu, E)$ y $\chi_2(\nu, E)$ que se diferencien entre sí solo por un factor que depende sólo de ν :

$$(19) \quad \chi_2(\nu, E) = Q(\nu) \cdot \chi_1(\nu, E),$$

producen una única distribución más probable: $Q(\nu)$ se reduce a (18). [Basado en la existencia de la condición adicional (14)].

III. Hasta ahora se presupuso que $\chi(\nu, E)$ es siempre finito y que por lo tanto en regiones de energía finita se tendrán pesos totales finitos, sin embargo no un peso de energía único. Más adelante (& 7, 8, 9), deberemos permitir también que con ciertos *valores singulares de energía*, surjan algunas funciones de peso, en las cuales en general solo se tenga una región de energía finita. Las diferentes consideraciones

se pueden transferir fácilmente para este caso más general. Entonces se da un paso más para que las integrales sobre el continuo de valores de E se sumen sobre los valores de E singulares.

& 4. La conexión de la distribución “más probable” con radiación “negra” y del $\log W$ con la definición termodinámica de la entropía de la radiación.

Establecemos esta conexión solo implícita y parcialmente formulando las siguientes demandas -como restricciones en la selección de la función de peso $\chi(\nu, E)$:

I. La distribución “más probable” de las oscilaciones naturales sobre las regiones de excitación debe ofrecer una distribución de energía espectral, cuyas particularidades de radiación negra se muestran juntas en & 1.

II. Con una compresión infinitamente lenta del cubo reflector, $\log W$ permanece constante, independientemente de cual sea la distribución inicial $a(\nu, E)$ de la cual se parta.

& 5. La función de peso tiene – aparte de un factor irrelevante – la forma:

$$\chi(\nu, E) = G(E/\nu)$$

La prueba se basa en la conexión de la demanda II en & 4 con la proposición II en & 2:

Tenemos inicialmente una distribución de estado $a(\nu, E)$. Comprimimos el cubo reflector infinitamente despacio desde una longitud l hasta una longitud l' . Establecemos que

$$(20) \quad \frac{l}{l'} = m.$$

Si le damos seguimiento a cada una de las oscilaciones naturales, tenemos a partir de las ecuaciones (9) y (10) que

$$(21) \quad v' = mv,$$

$$(22) \quad E' = mE.$$

Las oscilaciones naturales cuya frecuencia y energía originales se encontraban entre ν y $\nu + d\nu$ y entre E y $E + dE$, se encontrarán ahora entre

$$(23) \quad mv \text{ y } mv + mdv, \quad mE \text{ y } mE + mdE.$$

Por lo tanto

$$(24) \quad \alpha'(v', E') \cdot mdv \cdot mdE = a(\nu, E) \cdot d\nu dE.$$

De donde

$$(25) \quad \alpha'(v', E) = \frac{1}{m^2} a(\nu, E),$$

$$(26) \quad N(v') = \frac{1}{m} N(\nu).$$

Ahora, según (II & 4) para toda *posible* expresión inicial de $a(\nu, E)$ y para cada valor de m , debe cumplirse que:

$$(27) \quad \log W' - \log W = 0$$

A partir de (13) y de (20) a (26) y siguiendo cálculos intermedio simples se cumple, para todos las posibles funciones iniciales $a(\nu, E)$ y para toda m que:

$$(28) \quad \int_0^\infty d\nu \int_0^\infty dE a(\nu, E) \log \frac{\gamma(m\nu, mE)}{\gamma(\nu, E)} + \int_0^\infty d\nu N(\nu) \log m = 0$$

O, lo que es equivalente debido a (14):

$$(29) \quad \int_0^{\infty} dv \int_0^{\infty} dE a(v, E) \log \left\{ \frac{m\gamma(mv, mE)}{\gamma(v, E)} \right\} = 0.$$

Si en esta ecuación se le pudiera dar a $a(v, E)$ cualquier forma, entonces se seguiría inmediatamente que el argumento del logaritmo debe ser igual a 1 para todo valor de m . Sin embargo, ahora $a(v, E)$ está limitada por la condición (14). Para obtener una expresión del argumento del logaritmo y por lo tanto de la forma de $\gamma(v, E)$, se debe observar que el lado izquierdo de (29) junto con las variaciones aceptables de $a(v, E)$ en (14) debe producir un valor igual a cero. Resuelto este *problema de variación*, se obtiene como resultado –véase el apéndice A- que $\gamma(v, E)$ debe de tener la forma:

$$(30) \quad \gamma(v, E) = Q(v) \cdot G\left(\frac{E}{v}\right).$$

Sin embargo, el factor $Q(v)$ no tiene influencia en la distribución de energía espectral, de tal manera que queda probado el enunciado que encabeza esta sección.

& 6. Estructura de la función de peso $f\left(\beta \frac{v}{T}\right)$ en la ley de desplazamiento con ayuda de la función de peso $G\left(\frac{E}{v}\right)$

La distribución espectral “más probable” de la energía de la radiación por cm^3 se calcula con ayuda de la ecuación (18) como:

$$(31) \quad \frac{N(v)}{l^3} \cdot \frac{\int_0^{\infty} dE \cdot E e^{-\mu E} \gamma(v, E)}{\int_0^{\infty} dE \cdot e^{-\mu E} \gamma(v, E)}$$

Por medio de (8) y (30), esta expresión se convierte en:

$$(32) \quad \frac{8\pi v^3}{c^3} \cdot \frac{\int_0^{\infty} dE \cdot E e^{-\mu E} G\left(\frac{E}{v}\right)}{\int_0^{\infty} dE \cdot e^{-\mu E} G\left(\frac{E}{v}\right)}$$

Definimos

$$(33) \quad \frac{E}{v} = q,$$

De manera que (32) se convierte en:

$$(34) \quad \frac{8\pi}{c^3} v^3 \cdot \frac{\int_0^{\infty} dq \cdot q e^{-\mu v q} G(q)}{\int_0^{\infty} dq \cdot e^{-\mu v q} G(q)} = \frac{8\pi}{c^3} v^3 f(v\mu).$$

Entonces, ahora – en el sentido de la demanda I & 4 – esta expresión toma la forma

$$(35) \quad \alpha v^3 f\left(\beta \frac{v}{T}\right)$$

de donde es suficiente y necesario que el parámetro μ dependa de T de la siguiente forma

$$(36) \quad \mu = \frac{\beta}{T}$$

Con las simplificaciones

$$(37) \quad v\mu = \beta \frac{v}{T} = \sigma,$$

$$(38) \quad \frac{\alpha v^3}{8\pi} = C,$$

$$(39) \quad Z(\sigma) = \int_0^{\infty} dq \cdot q e^{-\sigma q} G(q),$$

$$(40) \quad N(\sigma) = \int_0^{\infty} dq \cdot e^{-\sigma q} G(q)$$

La ecuación (34) toma la forma

$$(41) \quad Cf(\sigma) = \frac{Z(\sigma)}{N(\sigma)}$$

& 7. Introducción de distribuciones puntuales además
de la distribución $G(E/\nu)$

En este punto es fácil ahora liberarse de las restricciones a las que nos referimos en & 3, III: Además de la distribución $G(q)$ que le asigna al elemento dq un peso infinitesimal $G(q)dq$, se pueden introducir los valores específicos $G_0, G_1, G_2 \dots$ como pesos especiales finitos para los puntos $q_0, q_1, q_2 \dots$. Si uno modifica las conclusiones al final de las secciones &&3-6, entonces se llega, a partir de (41) a la ecuación

$$(42) \quad Cf(\sigma) = \frac{P(\sigma)}{Q(\sigma)}$$

Donde para simplificar escribimos:

$$(43) \quad \sum_0^{\infty} r q_r e^{-\sigma q_r} G_r + \int_0^{\infty} dq \cdot q e^{-\sigma q} G(q) = P(\sigma),$$

$$(44) \quad \sum_0^{\infty} r e^{-\sigma q_r} G_r + \int_0^{\infty} dq \cdot e^{-\sigma q} G(q) = Q(\sigma)$$

Haciendo todas las $G_r = 0$, se puede siempre regresar a (41) para la distribución directa.

Observación: En todos los casos, donde $Q(\sigma)$ sea diferenciable con respecto a σ y la secuencia de derivar con respecto a σ e integrar (es decir, sumar) con respecto a q pueda ser intercambiable, es evidente que:

$$(44a) \quad Z(\sigma) = -\frac{d}{d\sigma} N(\sigma),$$

$$(44b) \quad P(\sigma) = -\frac{d}{d\sigma} Q(\sigma),$$

$$(44c) \quad Cf(\sigma) = -\frac{d}{d\sigma} \{\lg Q(\sigma)\}.$$

A 5.1 El Principio de Correspondencia⁴¹⁴

A.

1. Los átomos de Rutherford no podían *permanecer enteramente clásicos*, es decir, ajustarse plenamente a la mecánica y a la electrodinámica clásica. En efecto, de acuerdo con las ideas clásicas, un átomo de hidrógeno, por ejemplo, debería emitir un espectro continuo, y ya que el electrón circulando alrededor del núcleo, debería, como consecuencia de su radiación ininterrumpida, acercarse al núcleo siguiendo una trayectoria en espiral.

2. Bohr subordina los movimientos en el átomo de Rutherford a una *censura cuántica*. Dentro de esta censura se deja guiar sobre todo, por un lado, por el hecho de la discontinuidad de las series espectrales y por el principio de combinación de Ritz que se presenta en el estudio de estas discontinuidades, y por otro lado, por la ecuación de Planck-Einstein

$$\varepsilon = h\nu$$

3. *Dentro de lo posible*, él procura que su modelo de átomo *se ajuste a las reglas clásicas* (principio de inercia, ley de Coulomb); ahí donde eso no es posible (radiación), trata de establecer, *entre los movimientos dentro del átomo y la radiación emitida por él*, al menos *una correspondencia* tan extensa como sea posible.

4. Para encontrar esta correspondencia, Bohr se deja guiar por el siguiente principio heurístico: Se requiere que cuando se le asignen a los números cuánticos de un sistema cantidades de valor cada vez mayor, la radiación emitida tienda asintóticamente a la que el sistema emitiría siguiendo las reglas clásicas.

⁴¹⁴ Presentado originalmente bajo el título de *Le Principe de Correspondance* en la Conferencia Solvay de 1921 y reproducido en Ehrenfest (1959, pp. 120-124).

B.

5. En todos los casos que se entienden actualmente (casos donde «las variables son separables»), cada movimiento dentro del átomo goza de la propiedad siguiente: Las coordenadas x , y , z de cada electrón pueden ser representadas como funciones del tiempo por medio de series trigonométricas múltiples de la forma

$$(1) \quad \begin{aligned} x &= \sum_{p_1 p_2 \dots p_k} A_{p_1 p_2 \dots p_k} \cos[(p_1 \omega_1 + \dots + p_k \omega_k)t + \alpha_{p_1 \dots p_k}] \\ y &= \sum_{p_1 p_2 \dots p_k} B_{p_1 p_2 \dots p_k} \cos[(p_1 \omega_1 + \dots + p_k \omega_k)t + \beta_{p_1 \dots p_k}] \\ z &= \sum_{p_1 p_2 \dots p_k} C_{p_1 p_2 \dots p_k} \cos[(p_1 \omega_1 + \dots + p_k \omega_k)t + \gamma_{p_1 \dots p_k}] \end{aligned}$$

donde k es igual o menor el número de grados de libertad del átomo; p_1, \dots, p_k pueden tomar, independientemente unos de otros, todos los valores enteros positivos y negativos; las frecuencias fundamentales $\omega_1, \dots, \omega_k$, lo mismo que las amplitudes $A_{p_1 p_2 \dots p_k}$, $B_{p_1 p_2 \dots p_k}$, $C_{p_1 p_2 \dots p_k}$ de cada «tono combinado»

$$p_1 \omega_1 + \dots + p_k \omega_k$$

dependen además de la intensidad del movimiento considerado. Además, los «momentos angulares»

$$(2) \quad \mathfrak{S}_1, \mathfrak{S}_2, \dots, \mathfrak{S}_k,$$

que corresponden a las coordenadas angulares

$$(3) \quad w_1 = \omega_1 t, \quad w_2 = \omega_2 t, \quad \dots, \quad w_k = \omega_k t,$$

son independientes del tiempo.

6. Desde el punto de vista de la electrodinámica clásica se esperaría que el átomo emitiera, en general, al mismo tiempo, todas los «tonos combinados» a las frecuencias de vibración

$$(4) \quad \frac{1}{2\pi} (p_1 \omega_1 + p_2 \omega_2 + \dots + p_k \omega_k),$$

La pérdida continua de energía por radiación causaría además una variación continua de $\omega_1, \dots, \omega_k$, lo que daría origen a un espectro de emisión continua (ver n° 1).

7. Se sabe que, de acuerdo con la teoría de Bohr, no existe radiación (contrariamente a la electrodinámica clásica) en tanto que el sistema ejecuta uno de los movimientos «estacionarios», que se caracterizan, según Bohr, Sommerfeld, Epstein, Schwarzschild, por

$$(5) \quad 2\pi\mathfrak{S}_1 = n_1 h, \quad \dots, \quad 2\pi\mathfrak{S}_k = n_k h$$

(n_1, \dots, n_k son números enteros, independientes unos de otros: a cada coordenada angular $w_s = \omega_s t$ corresponde entonces, dentro del movimiento estacionario considerado, un mismo número).

8. No es sino en el momento en que se pasa de un movimiento estacionario caracterizado por los números n'_1, \dots, n'_k , a otro donde los números son n''_1, \dots, n''_k , que el electrón emite una radiación monocromática, cuya frecuencia de vibración es, como se sabe,

$$(6) \quad \nu = \frac{\mathcal{E}' - \mathcal{E}''}{h}.$$

9. A primera vista, no parece existir ninguna relación entre la frecuencia de vibración «cuántica» (6) y cualesquier otro tipo de combinación de vibraciones clásicas (4) del átomo.

10. Sin embargo, guiado por los principios mencionados en (3) y (4), Bohr establece una semejanza; es el *teorema* (de correspondencia), formulado más abajo, que luego complementa con una *hipótesis* (de correspondencia) de lo más fructífera.

C.

11. Para formular el *teorema* encontrado por Bohr, tomamos una transición $(n'_1, \dots, n'_k) \rightarrow (n''_1, \dots, n''_k)$ y consideramos, dentro de la serie trigonométrica (1), especialmente la frecuencia de combinación para la cual

$$(7) \quad p_1 = n'_1 - n''_1, \quad p_2 = n'_2 - n''_2, \quad \dots, \quad p_k = n'_k - n''_k$$

Nos referiremos a ellas como las vibraciones de combinación «calificadas» de la transición $(n'_1, \dots, n'_k) \rightarrow (n''_1, \dots, n''_k)$. Sus frecuencias vibratorias están dadas por

$$(8) \quad N_{n' \rightarrow n''} = \frac{1}{2\pi} [(n'_1 - n''_1)\omega_1 + \dots + (n'_k - n''_k)\omega_k].$$

Para la formación de un promedio, ahora debemos contemplar un cierto grupo de movimientos que constituyan un puente de interpolación (lineal) entre ambos movimientos estacionarios (n''_1, \dots, n''_k) y (n'_1, \dots, n'_k) ; son los movimientos para los cuales

$$(9) \quad \frac{2\pi\mathfrak{S}_1}{h} = n_1'' + \lambda(n_1' - n_1''), \quad \dots, \quad \frac{2\pi\mathfrak{S}_k}{h} = n_k'' + \lambda(n_k' - n_k''),$$

λ puede tomar todos los valores comprendidos entre 0 y 1. (En este caso los coeficientes de los segundos términos ya no son, en general, números enteros; estos movimientos interpolados no son, por tanto, «movimientos» estacionarios. Provisionalmente juegan sólo el papel de magnitudes auxiliares dentro del cálculo). Como las magnitudes $\omega_1, \dots, \omega_k$ dependen, como ya lo hemos dicho, de la intensidad del movimiento, las frecuencias vibratorias (8) de los tonos de combinación calificados de la transición $(n'_1, \dots, n'_k) \rightarrow (n''_1, \dots, n''_k)$ tendrán un valor que, para los diferentes movimientos interpolados, dependerá todavía de λ . Estableciendo el valor promedio de esta «altura de tono» igual a

$$(10) \quad \int_0^1 N_{n' \rightarrow n''}(\lambda) d\lambda = \overline{N}_{n' \rightarrow n''},$$

Bohr deduce a partir de las propiedades fundamentales de su modelo de átomo, el teorema siguiente

$$(11) \quad \nu_{n' \rightarrow n''} = \overline{N}_{n' \rightarrow n''}$$

En todas sus letras, esto quiere decir que la ν «cuántica» (6) de la radiación emitida en el momento de la transición $n' \rightarrow n''$ es igual al promedio de las frecuencias vibratorias de los tonos de combinación calificados, tomadas para todos los movimientos (9') que llenan linealmente el hueco entre los movimientos estacionarios (n'_1, \dots, n'_k) y (n''_1, \dots, n''_k)

12. Para valores suficientemente grandes de n'_1 y n''_s , pero tales que $n'_s - n'_1$ sea pequeño, $\overline{N}_{n' \rightarrow n''}$ es ya casi independiente de λ y se confunde entonces casi con \overline{N} : de

acuerdo con el principio heurístico n° 4, la v cuántica y la frecuencia vibratoria de los tonos de combinación calificados coinciden entonces aquí asintóticamente.

D.

13. Gracias a las propiedades especiales del sistema (por ejemplo en el movimiento de un electrón en un campo con simetría axial), puede suceder que ciertos tonos de combinación falten en las series de Fourier (1), es decir, que para todos los movimientos del sistema sus amplitudes sean exactamente igual a cero. En estas condiciones, la radiación de los tonos de combinación correspondientes no se puede prever, incluso desde el punto de vista clásico. ¿Cuáles son, en tal caso, las condiciones impuestas por la teoría cuántica?

14. Basándose en parte en el principio heurístico n°. 4 y en parte en la idea de una «correspondencia» entre la radiación emitida y los tonos de combinación calificados, Bohr hace la hipótesis siguiente: No es solamente en el límite de números cuánticos muy grandes, sino de modo completamente general, que la existencia o no existencia de una transición espontánea $(n'_1, \dots, n'_k) \rightarrow (n''_1, \dots, n''_k)$ corresponde a la presencia o ausencia del tono de combinación calificado (7) en los movimientos que sirven de puente de interpolación en esta transición [ver ecuación (8)].

15. De este modo, las propiedades especiales de un sistema pueden tener como consecuencia el establecimiento de una «selección» entre todas las transiciones imaginables, por ejemplo la desaparición de líneas espectrales que se podría esperar observar de acuerdo con el principio de combinación de Ritz, o la polarización de ciertas líneas en un campo eléctrico o magnético, cuando los correspondientes tonos de combinación en las series de Fourier (1) no proporcionan, por ejemplo, una contribución al movimiento paralelo al eje z (paralelo al campo), sino más bien al movimiento en un plano paralelo a x, y . Bohr pudo, de esa manera, explicar también este fenómeno interesante de que ciertas líneas que están ausentes en circunstancias

normales, aparezcan bajo el efecto de un campo perturbador. El muestra particularmente que los tonos de combinación que primero fueron excluidos en virtud de una simetría del átomo, vuelven a aparecer cuando esta simetría es alterada por la presencia del campo externo.

16. Bohr establece también un cierto paralelismo entre la intensidad relativa de los diversos tonos de combinación y la intensidad relativa con la cual un conjunto de átomos emite la línea espectral correspondiente (es decir, la frecuencia estadística relativa de las transiciones correspondientes). Pero es sólo para la comparación de líneas vecinas (por ejemplo para la descomposición de una línea por el efecto Stark), que él admite un paralelismo simple. Para la intensidad relativa de dos líneas diferentes de una misma serie, por ejemplo, hay otros factores que también intervienen.

E.

17. Sean (M') y (M'') dos movimientos «estacionarios» diferentes de un sistema. Es posible que en los casos generales, este puente de interpolación de movimientos intermedios, del que nos hemos servido, oponiendo a una cierta transición la radiación clásica correspondiente, no exista en absoluto. ¿Qué hacer entonces? ¿La idea fundamental de la «correspondencia» implica que en este caso la transición $M' \rightarrow M''$ se lleva a cabo por medio de una radiación espontánea? Esto sería una nueva fuente de reglas que limitaría la selección de las vías por las cuales un átomo puede reconstituirse después de una perturbación.

(Hasta donde yo sé, las publicaciones existentes de Bohr no dejan conocer todavía con certeza la posición que él toma con respecto a esta cuestión).

18. El significado más profundo de los ensayos de Bohr sobre la correspondencia, reside fundamentalmente en que provisionalmente nos permite acercarnos a esta teoría futura, que esperamos que resuelva las dificultades que encontramos cuando

queremos tratar los fenómenos de la radiación aplicando a la vez los métodos clásicos y los métodos cuánticos. Es por eso que no es deseable que con vistas a una aplicación automática dentro de lo posible, se arruine de una forma rígida la condición de correspondencia que hasta ahora es aún variable y tentativa.

A 5.2 Anotaciones teórico-cuánticas sobre el experimento de Stern y Gerlach⁴¹⁵

& 1. O. Stern y W. Gerlach hicieron pasar un haz de átomos de plata a través de un campo magnético para determinar si los átomos poseían un momento magnético y, si ese era el caso, que orientación exhibía durante su travesía por el campo magnético. Su experimento arrojó como resultado muy significativo el siguiente: el momento magnético de todos los átomos colapsa durante su paso por el campo con la dirección de las líneas de fuerza, quedando aproximadamente la mitad de los átomos en el sentido del campo y en sentido contrario la otra mitad. Surge de manera natural la pregunta sobre de qué manera los átomos obtienen esta orientación.

& 2. Sobre todo debe de observarse que los átomos no experimentan colisiones durante su entrada al campo magnético – la última colisión la experimentan en el depósito de vapor del horno.

Nos preguntamos primero como es que en todo caso los átomos magnéticos cambian su orientación bajo la influencia de un campo magnético. En tanto que dejemos fuera la emisión y absorción de la radiación, las colisiones u otras influencias similares, los átomos en un campo magnético llevan a cabo un movimiento de precesión (rotación de Larmor) en torno de la dirección del campo. Si la dirección del campo cambia lentamente en comparación con la rapidez del movimiento de precesión, entonces el ángulo del movimiento de precesión permanece sin cambio. Una disposición de las inclinaciones demandadas por la teoría cuántica (0 y π para el átomo de plata en el experimento de Stern y Gerlach) no puede tener lugar sin influencia externa del tipo de radiación o de colisiones.

& 3. La explicación más cercana de los resultados experimentales parece estar, en primera instancia, en que la disposición de los átomos se establece durante

⁴¹⁵ Escrito conjuntamente con Einstein y publicado originalmente bajo el título de *Quantentheoretische Bemerkungen zum Experiment von Stern und Gerlach* en *Zeitschrift für Physik*, 11, 31-34 (1922) y reproducido en Ehrenfest (1959, pp. 452-455).

la entrada al campo de los electromagnetos por medio de intercambio de radiación. Hay entonces necesariamente, no solo entrega, sino también absorción de energía del campo de radiación, esto último para los átomos posicionados en forma antiparalela a las líneas de fuerza. ¿Qué tan rápido ocurre la reorientación de los momentos atómicos bajo el influjo de la radiación (a temperatura ambiente)? Se puede estimar con relativa certeza el tiempo necesario para el caso de las transiciones de un estado cuántico a otro. Como sabemos, en casos de este tipo para la transición de los átomos, este tiempo concuerda en todos los casos (al menos en orden de magnitud) con los correspondientes en los modelos clásicos. En nuestro caso de átomos en precesión con momento magnético, sería el de un dipolo magnético radiando con su rotación cónica. El tiempo de establecimiento sería (con una intensidad de campo de 10000 gauss) del orden de 10^{11} segundos, sólo en el caso de que la radiación emitida por el movimiento de precesión fuera efectiva. Sin embargo, si uno considera la influencia de la radiación circundante a temperatura ambiente, se reduce a aproximadamente 10^9 segundos.

Estos son, en todo caso, tiempos con un orden de magnitud que no pueden entrar en consideración para el experimento, puesto que la disposición final debe ocurrir en un tiempo menor a los 10^{-4} segundos.

& 4. Si uno intenta salir de esta dificultad, se presentan de entrada dos supuestos alternativos:

A. El mecanismo real consiste en que los átomos nunca pueden estar en un estado en el que no estén completamente cuantizados.

B. Se llega a los estados por medio de rápidos efectos, lo cual va contra las reglas cuánticas relativas a la orientación; las condiciones requeridas por las reglas cuánticas se producen por medio de la radiación absorbida y emitida, pero con una rapidez de reacción mucho mayor que con una transición de un estado cuántico a otro.

De momento no es posible tomar una decisión a priori entre estas alternativas, pero se pueden indicar sus principales diferencias y aclarar las dificultades características que cada una de ellas conlleva.

& 5. Discusión de la alternativa A.

1. Lo que demanda esta alternativa se puede particularmente ejemplificar muy bien en el experimento de Stern-Gerlach: En el depósito de vapor del horno cada átomo de plata y su correspondiente eje magnético dominante queda completamente cuantizado inmediatamente después de cada colisión. Después de su última colisión, durante su paso por las diferentes partes del campo, su orientación se mantiene en la dirección del campo durante su paso por el lugar.

2. ¡Además, una parte de los Momentos (monocuantizados) será paralelo al campo y otra parte antiparalelo, en tanto que la distribución estadística estará controlada por la temperatura y la intensidad del campo en el depósito de vapor del horno y de ninguna manera por la temperatura (de la radiación) y la intensidad del campo en el espacio por donde pasa después!

3. Uno tiene entonces que aceptar los siguientes supuestos: Incluso los campos débiles deben decidir inmediatamente su orientación después de una colisión (es decir, por el efecto de los campos fuertes). Cuando hay cambios, por ejemplo en la dirección de los campos magnéticos, con gran rapidez en relación con la rotación de Larmor, el eje magnético del átomo debe seguir igualmente la dirección del campo, de la misma manera que cuando los cambios son lentos. De manera más general: en caso de cambios arbitrariamente rápidos en las condiciones externas de un sistema mecánico, éste tendría que aparecer en el mismo estado final, que cuando se ejecutan los cambios de manera infinitamente lenta (adiabáticamente) de las condiciones externas. Que esto requiere renunciar a las ecuaciones mecánicas, se puede aclarar fácilmente con ejemplos.

& 6. Discusión de la alternativa B.

1. Para el experimento de Stern-Gerlach surgiría la siguiente imagen: En el depósito de vapor del horno los ejes magnéticos de los átomos se orientan inmediatamente después de cada colisión en forma arbitraria en relación a los campos débiles ahí presentes. La orientación ocurre a través de la radiación infrarroja, es decir, por medio de la emisión y la absorción de la radiación con una disposición paralela y antiparalela al campo. Además se tiene la condición esencial de que la probabilidad de conversión de dicha transición de un estado no cuántico a uno cuántico corresponde a un orden de magnitud mucho mayor que una transición de un estado cuántico a otro. Después de la última colisión la orientación del eje se adapta cuasi-adiabáticamente, durante su viaje por las diferentes partes del campo, a la dirección cambiante del campo, en donde cada vez que ocurre un pequeño defecto angular, se balancea con la ayuda de un intercambio de radiación extremadamente débil de frecuencia muy infrarroja (incluso más infrarroja que la frecuencia de precesión).

2. La distribución estadística entre orientación paralela y antiparalela al campo estaría esencialmente determinada también en este caso por la temperatura e intensidad del campo en el horno.

3. Según la alternativa B, un vapor monoatómico, cuyos átomos tienen un momento magnético, en un campo magnético, emitirían y absorberían del lado del espectro de longitudes de onda largas respecto del la frecuencia del movimiento de precesión; por lo tanto con un campo magnético apropiado en la región de las ondas eléctricas.

4. Es característico de esta alternativa que la adaptación del estado cuántico depende de la probabilidad de emisión y absorción de la radiación. Y entonces esto establece una diferencia fundamental entre sistemas puramente mecánicos y sistemas radiantes. Por ejemplo, los ejes de rotación de giroscopios simétricos pesados deberían entonces poder alcanzar ahora la disposición cuántica relativa a los campos intensos, si el giroscopio porta carga eléctrica apropiada. Si uno quisiera llevar al

extremo la hipótesis B de la disposición relativa a la orientación hacia la disposición de todo estado cuántico, es decir, por ejemplo también a permitir, en las oscilaciones de una red cristalina y las rotaciones de las moléculas, una disposición espontánea por vía cuántica sólo en el caso de carga eléctrica apropiada, entonces se hace evidente la contradicción con la experiencia en relación con los calores específicos, por ejemplo, del diamante y la formación del gas H_2 .

& 7. Las dificultades enumeradas muestran lo insatisfactorio que son los dos intentos de interpretación aquí discutidos en relación con los resultados encontrados por Stern y Gerlach. El punto de vista de Bohr – de que en campos más complejos no existe en general una clara cuantización – no se ha discutido.

A 5.3 Transformaciones adiabáticas en la teoría cuántica y el tratamiento que de ellas hace Niels Bohr⁴¹⁶

1. El trabajo de Bohr ha traído una cantidad incalculable de fructíferas aplicaciones de su teoría. Para sacar provecho al sumergirnos en esta riqueza, debemos permitir que el mismo *Bohr* nos recuerde una y otra vez cuál es el problema *real* que él afronta: descubrir los *Principios* de la Teoría que en algún momento reemplazará la teoría “clásica”. En el estado actual, para la formulación de estos principios, debe uno de servirse de aquellos conceptos que se desarrollan dentro de la mecánica y la electrodinámica clásica. De ahí, fácilmente se origina la impresión de que, por ejemplo, el principio de correspondencia o el principio adiabático, preparan una reconciliación de la teoría cuántica con la teoría clásica o casi un retorno a ella. Sin embargo, *Bohr* sabe demostrarnos convincentemente que: estos principios son vistos, a pesar de su formulación cuasi-clásica, “como leyes puramente teórico-cuánticas”; ¡no apuntan de ninguna manera hacia una vuelta a nada! – Se presenta aquí, para su discusión, uno de estos principios, el “Principio Adiabático” que en manos de Bohr se ha convertido en un maravilloso y agudo instrumento, de lo que me siento asombrado de cómo se ha hecho; porque probablemente no hay provisionalmente, según creo, discusión más profunda y al mismo tiempo más sucinta del Principio Adiabático, que la que ofrece el mismo Bohr, al mismo tiempo que busca con claridad las relaciones orgánicas entre el Principio Adiabático y el Principio de Correspondencia. Veo sólo una forma de presentar las consecuencias que me salen a la vista: Puedo intentar mostrar, en una representación más genética, cómo llega uno gradualmente a la “hipótesis adiabática”, al énfasis del concepto de “invariantes adiabáticas” y al Teorema de “la invarianza adiabática de las funciones de peso establecidas a priori” en la estadística cuántica, y al final cerrar apuntando a los lugares en los escritos de Bohr en los que aparece de manera especialmente

⁴¹⁶ Publicado originalmente bajo el título de *Adiabatische Transformationen in der Quantentheorie und ihre Behandlung durch Niels Bohr* en *Naturwissenschaften*, 11, 543-550 (1923) y reproducido en Ehrenfest (1959, pp. 463-470). En este apéndice solamente se han traducido 3 secciones de un total de 11 que contiene el artículo original.

vívida, qué elementos esclarecedores y de profundización, y qué nuevas perspectivas le debemos a la intervención de Bohr.

2. Antes que nada enfatizamos: las leyes de radiación de Boltzmann y la ley de desplazamiento de W. Wien – más exactamente el secreto que se esconde detrás de la elegante derivación electrodinámica termodinámica de estas leyes – es lo que atrajo el camino que lleva al Principio adiabático. La ley de desplazamiento de W. Wien ha sido derivada con bases puramente clásicas. ¿Cómo puede quedar sin embargo inalterada en medio de los fenómenos de la radiación cuyas características cuánticas se revelan de manera cada vez más inexorable? La sorpresa que esto significa no puede ocultarse; acaso apunta a la “validez” asintótica de la mecánica clásica en la región de números cuánticos grandes. Porque la ley de desplazamiento también es válida en la región de números cuánticos más pequeños; a decir, también para valores pequeños de T y valores grandes de ν . Se tuvo que llegar – desde el punto de vista actual – a un tipo especial de comportamiento “pseudoclásico” de los sistemas cuánticos, y del análisis de la derivación de la ley de desplazamiento uno puede ser capaz de entender hasta donde, en medio del mundo cuántico y con la ayuda de la mecánica (electrodinámica) clásica y la termodinámica clásica – y probablemente también de la estadística de Boltzmann –, se pueden aún encontrar resultados correctos. – Es también importante considerar el hecho de que en 1902 *Lord Rayleigh* había derivado un Teorema mecánico que utilizó para probar la ley de radiación de Boltzmann, que a su vez permite resumir todos los elementos mecánico-electrodinámicos en la derivación de la ley de desplazamiento de Wien de manera extraordinariamente concisa; mucho más concisa que en su representación usual, la cual opera algunas veces con rayos lumínicos y el principio de Doppler. Me refiero al siguiente Teorema: Si se excitan las oscilaciones naturales de la radiación en una cavidad hueca reflectora, y luego vamos reduciendo la cavidad, de manera infinitamente lenta, acercando las paredes reflectoras de la misma (a expensas del trabajo de compresión realizado contra la presión de la radiación), la energía parcial de todas las oscilaciones naturales crecerá de manera directamente proporcional con su frecuencia:

$$\frac{\mathcal{E}_s'}{\nu_s'} = \frac{\mathcal{E}_s}{\nu_s}$$

donde \mathcal{E}_s , \mathcal{E}_s' es el contenido de energía y ν_s , ν_s' es la frecuencia de la s-ima oscilación natural antes y después de la compresión “adiabática”. Este Teorema de Rayleigh ayudó de manera sustancial en los esfuerzos por clarificar la *posición* que adquiere la ley de desplazamiento en la teoría de la radiación de Planck. Podemos aquí acercarnos más a la situación; ya que aquí se empieza a revelar a sí mismo – de hecho, al principio sólo en un caso límite único y peculiar – el papel que juegan las invariantes adiabáticas en general en la teoría cuántica y en particular también en la estadística cuántica.

3. La hipótesis de la energía discreta de Planck ($\epsilon = 0, h\nu, 2h\nu, \dots$) proporcionó (1901) una fórmula para la radiación que concuerda con todos los experimentos. ¿Pero son *inevitables* todos los aspectos de esta hipótesis? Cuanto más claramente surge a la conciencia que no es fácil interpretarla por medios clásicos, más interesante resulta analizarla: Qué aspectos de esta hipótesis son *necesarios* para llegar al hecho de que la fórmula de la radiación pertenece a un proceso totalmente general y qué aspectos determinan únicamente los *detalles* cuantitativos de esos procesos. – Además resulta un poco más cómodo observar, no la distribución de energía de los “resonadores”, como lo hace *Planck*, sino la distribución de energía de las oscilaciones naturales, como lo hace *Rayleigh*, de una cavidad hueca reflectora. La aplicación del Teorema de *Boltzmann* de la equipartición de energía lleva aquí – como lo ha enfatizado *Rayleigh* – directamente a un absurdo; a la “catástrofe ultravioleta”: El número infinitamente grande de oscilaciones naturales ultravioletas de la cavidad hueca tomarían cada una la cantidad de energía kT para sí, haciendo la energía total infinita. ¿Qué aspecto de la hipótesis de la discretización de la energía es la que sobre todo elimina este desastre del violeta? La derivación combinatoria de Boltzmann del estado más probable recae sustancialmente en el siguiente señalamiento: que las regiones con volúmenes iguales en el espacio de fase de las

moléculas (“espacio μ ”), deben de tener la “misma probabilidad a priori”; es decir, Boltzmann cubre el espacio μ con un “peso” igual en toda la región. Aparece en íntima conexión con esto el hecho de que *Boltzmann* siempre nos conduce hacia la equipartición de la energía (cinética). Contrario a eso, la hipótesis de discretización de la energía de *Planck* asigna a todos los puntos en el espacio de fase de los resonadores un peso nulo y solamente el punto cero ($q = p = 0$) y las elipses $\epsilon = h\nu$, $2h\nu, \dots$ reciben un peso. Así, *Planck* abandona el punto de vista de Boltzmann y de esa manera libera llanamente de la equipartición el balance de la radiación. Sobre la parte estadística de la teoría de *Planck* se ve claramente que: los paquetes de energía con valor creciente de ν , que corresponden a la parte decreciente de la fórmula de la radiación en el ultravioleta evitando la catástrofe del violeta – las oscilaciones naturales para temperaturas dadas adquieren, por decirlo así, una probabilidad (“a posteriori”) mucho menor de salir de su nivel cero, que un competidor infrarrojo con sus requerimientos mucho más modestos.

Referencias

- Barrow, J. D. (2004). *The Constants of Nature: The Numbers that Encode the Deepest Secrets of the Universe*. New York: Vintage Books.
- Becker, B. J. (1987). *The Effect of World War I on Cooperation among European Scientists: Progress in the Development of Atomic Theory during the War*. Obtenido el 5 de marzo del 2007 en:
<http://eee.uci.edu/clients/bjbecker/RevolutingIdeas/week9a.html>
- Bernal, J.D. (1989). *La ciencia en la historia*. México: Nueva Imagen.
- Boeyink, R. (2005). *In het centrum van het drama: Wetenschappelijke worstelingen van Paul Ehrenfest tussen 1916 – 1925*. Doctoraalscriptie. Universiteit Utrecht.
- Boltzmann, L. (1986). *Escritos de mecánica y termodinámica*. Madrid: Alianza Editorial. Traducción, introducción y notas de Javier Ordoñez.
- Bohr, N. (1913). On the Constitution of Atoms and Molecules. *Philosophical magazine*, 26, 1-25. Consultado el 4 de abril del 2007 en
<http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Chem-History/Bohr/Bohr-1913a.html>
- Bronowski, J. (1977). *A sense of the future: Essays in Natural Philosophy*. Cambridge (Massachussets, Estados Unidos): The MIT Press.
- Brush, S. (1994). *The kind of motion we call heat*. Amsterdam: North Holland Personal Library.
- Carnot, S. (1987). *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia*. Madrid: Alianza Editorial. Traducción, introducción y notas de Javier Ordoñez.
- Cohen, E.G.D. (1990). George E. Uhlenbeck and statistical mechanics. *American Journal of Physics*, 58(7), 619-625. Obtenido el 1 de marzo del 2007 de la base de datos en línea publicada por la American Association of Physics Teachers.
<http://scitation.aip.org/getpdf/servlet/GetPDFServlet?filetype=pdf&id=AJPIA S000058000007000619000001&idtype=cvips&prog=normal>

- Darrigol, O. (1992). *From c-Numbers to q-Numbers: The Classical Analogy in the History of Quantum Theory*. Berkeley: University of California Press.
<http://ark.cdlib.org/ark:/13030/ft4t1nb2gv/>
- De Regt, H.W. (1996). Are physicists' philosophies irrelevant idiosyncrasies?.
Philosophica, 58, 125-151.
- Ehrenfest, P. (1959). *Collected Scientific Papers*. M. J. Klein, editor. Amsterdam: North-Holland Publishing Company.
- Ehrenfest, P. & T. (1959). *The Conceptual Foundations of the Statistical Approach in Mechanics*. New York: Dover Publications, Inc. Translated by Michael J. Moravcsik.
- Ehrenfest, T. (1958). On the use of the Notion "Probability" in Physics. *American Journal of Physics*, 26(6), 388-392. Obtenido el 2 de marzo del 2006 de la base de datos en línea publicada por la American Association of Physics Teachers.
http://scitation.aip.org/getpdf/servlet/GetPDFServlet?filetype=pdf&id=AJPIA_S000026000006000388000001&idtype=cvips&ident=free&prog=search
[h](#)
- Einstein, A. (1950). *Out of my Later Years*. New York: Philosophical Library.
- _____ (1954). Physics and Reality. En *Ideas and Opinions*. New York: Crown Publishers, 290-323.
- _____ (1970a). Autobiographical Notes. En: P. A. Schilpp (ed.) *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. New York: Library of Living Philosophers, MJF Books, 1-96.
- _____ (1970b). Remarks to the Essays Appearing in this Collective Volume. En: P. A. Schilpp (ed.) *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. New York: Library of Living Philosophers, MJF Books, 663-688.
- _____ (1983). *Sidelights on relativity*. Nueva York: Dover.
- _____ (1994). *Correspondencia con Michele Besso : 1903-1955 / Albert Einstein*. Barcelona: Tusquets Editores. Edición, prólogo y notas de Pierre Speziali. Traducción de Manuel Puigcerver.

- Einstein, A. & Infeld, L. (1958). *La física, aventura del pensamiento*. Buenos Aires: Editorial Losada.
- Ferreiros, J. & Ordóñez, J. (2002). Hacia una filosofía de la experimentación. *CRITICA, Revista Hispanoamericana de Filosofía*, 34(102), 47-86.
- Friederich B. & Herschbach, D. (1998). Space quantization: Otto Stern's lucky star. *Daedalus*, 127(1), 165-182. Consultado el 1 de junio del 2007 en http://findarticles.com/p/articles/mi_qa3671/is_199801/ai_n8795776/pg_2
- _____ How a bad cigar helped reorient atomic physics. *Physics Today*, 56, 53-59. Consultado el 1 de junio del 2007 en <http://www.fhi-berlin.mpg.de/mp/friedrich/PDFs/ptsg.pdf>.
- Forman, P. (1971/1984). *Cultura en Weimar, causalidad y teoría cuántica, 1918-1927*. Madrid: Alianza Universidad.
- Gamow, G. (1966/1985). *Thirty years that shook physics*. New Cork: Dover Publications.
- García-Colín, L. (2004). *La Naturaleza Estadística de la Teoría de los Cuantos*. México: El Colegio Nacional.
- Glazer, A. M. & Wark, J.S. (2001). *Statistical Mechanics: A survival guide*. Oxford University Press.
- Goudsmit, S.A. (1971). De ontdekking van de electronenrotatie, *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde*, 37, 386.
- Guttmann, Y. M. (1999). *The Concept of Probability in Statistical Physics*. Cambridge University Press.
- Guzmán, R. (2004). El papel de la imaginación científica: La revolución de la física en los inicios del siglo XX. *Revista de Humanidades: Tecnológico de Monterrey*, 17, 99-113.
- Hacking, I. (1996). *Representar e intervenir*. México: Paidós. Traducción de la edición en inglés, Cambridge University Press, 1983.
- Halpern, P. (2004). Nordström, Ehrenfest, and the Role of Dimensionality in Physics. *Physics in Perspectiva*, 6(4), 390-400.

- Harman, P. M. (1990). *Energía, fuerza y materia: el desarrollo conceptual de la física del siglo XIX*. Madrid: Alianza Editorial. Traducción de la edición en inglés, Cambridge University Press, 1982.
- Hendry, J. (1980). Weimar Culture, Causality and Quantum Theory, 1918-1927. En: C. Chant y J. Fauvel (eds.) *Darwin to Einstein: Historical Studies on Science and Belief*. New York: Longman Inc., 303-326.
- Holton, G. (1982). *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein*. Madrid: Alianza Editorial.
- _____ (1993). *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Barcelona: Editorial Reverté.
- _____ (1998a). *Einstein, historia y otras pasiones*. Madrid: Taurus.
- _____ (1998b). *La imaginación científica*. México: Fondo de Cultura Económica.
- _____ (1998c). *The advancement of science, and its burdens*. Cambridge: Harvard University Press.
- _____ (2003). Perspectives on the Thematic Analysis of Scientific Thought. Artículo invitado para una Conferencia Internacional en Rabat, Marruecos y disponible en <http://www.physics.harvard.edu/holton/RabatMS.pdf>
- Hughes, H. S. (1977). *Consciousness and Society*. New York: Vintage Books (A Division of Random House).
- Jolink, A. J. (2003). *Jan Tinbergen. The Statistical Turn in Economics: 1903-1955*. Rotterdam: Chimes.
- Jungnickel, C. & McCormach R. (1990). *Intellectual Mastery of Nature*. Vol. II: The Now Mighty Theoretical Physics 1870-1925. Chicago: The University of Chicago Press.
- Kac, M. (1959). *Probability and Related Topics in the Physical Sciences*. New York: Interscience Pub.
- Klein, M. J. (1973). The Development of Boltzmann's Statistical Ideas. En: E.G.D. Cohen & W. Thirring (eds.) *The Boltzmann Equation*. Wien: Springer, 53-106.

- _____ (1981). Not by discoveries alone: The centennial of Paul Ehrenfest. *Physica A (Elsevier)*, 106, 3-14. Consultado el 8 de marzo del 2006 en http://www.rowdyboeyink.org/ehrenfest/images/centennial_klein.pdf
- _____ (1985). *Paul Ehrenfest: The making of a theoretical physicist*. Ámsterdam: North-Holland Physics Publishing.
- _____ (1989). Physics in the Making in Leiden: Paul Ehrenfest as Teacher. En: A. Sarlemijn y M.J. Sparnaay (eds.) *Physics in the Making: Essays on Developments in 20th Century Physics*. Ámsterdam: North-Holland, 29-44.
- _____ (1993). *Physicists' Inaugural Lectures in History*. Ámsterdam: Ámsterdam University Press.
- Kragh, H. (2000). Max Planck: the reluctant revolutionary. <http://physicsweb.org/articles/world/13/12/8>
- Kuhn, T. (1962/1970). *La estructura de las revoluciones científicas*. México: Fondo de Cultura Económica.
- _____ (1982). La función de los experimentos imaginarios. En: T. S. Kuhn *La tensión esencial*. México: Fondo de Cultura Económica, 263-289. Traducción de la edición en inglés, University of Chicago Press, 1977.
- _____ (1987). *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica 1894-1912*. Madrid: Alianza Editorial.
- _____ (2002). La metáfora en la ciencia. En: T. S. Kuhn *El camino desde la estructura*. Barcelona: Paidós, 233-246.
- Lakatos, I. (2002). *Escritos filosóficos. 1. La metodología de los programas de investigación científica*. Madrid: Alianza. Traducción de la edición original, 1982.
- Levinas, M. L. (2001). Filosofía y ciencias de la naturaleza en el siglo XIX. En: J. L. Villacañas (ed.) *La filosofía del siglo XIX*. Madrid: Trotta, 303-336.
- Lombardi, O. (2003). El problema de la ergodicidad en la mecánica estadística. *CRITICA, Revista Hispanoamericana de Filosofía*, 35(103), 3-41.
- Luntheren, F. H. van (2003). Paul Ehrenfest: de Leidse onderzoekschool van een fysicus in diaspora. Consultado el 4 de febrero del 2007 en <http://www.rowdyboeyink.org/ehrenfest/images/Ehrenfest2.doc>

- _____ (2004). *Paul Ehrenfest and Dutch physics in the interwar period* (conferencia). Transcripción de la conferencia consultada el 6 de marzo del 2007 en <http://www.rowdyboeyink.org/ehrenfest/images/Vancouver2.doc>
- Mandelbaum, M. (1980). *Philosophic Movements in the Nineteenth Century*. En: C. Chant y J. Fauvel (eds.) *Darwin to Einstein: Historical Studies on Science and Belief*. New York: Longman Inc., 2-44.
- Maxwell, J.C. (1891/1954). *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Vol. II. 3a. edición. New York: Dover Publications.
- Mehra, J. & Rechenberg, H. (1982). *The Historical Development of Quantum Theory*. Vols. I y IV. New York: Springer-Verlag.
- McCormmach, R. (1967). Henri Poincaré and the Quantum Theory. *Isis*, 58(1), 37-55. Consultada el 5 de octubre del 2006 en <http://www.jstor.org/cgi-bin/jstor/printpage/00211753/ap010141/01a00030/0.pdf?backcontext=page&dowhat=Acrobat&config=jstor&userID=83b25096@mtv.itesm.mx/01cce4406600501af6f80&0.pdf>
- Moya, E. (1998). *Crítica de la razón tecnocientífica*. Madrid: Biblioteca Nueva.
- Navarro, L. & Pérez, E. (2002). Principio de Boltzmann y primeras ideas cuánticas en Einstein. *Dynamis*, 22, 377-410
- _____ (2004). Paul Ehrenfest on the Necessity of Quanta (1911): Discontinuity, Quantization, Corpuscularity, and Adiabatic Invariance. *Archives for History of Exact Sciences*, 58(2), 97-141.
- _____ (2006). Paul Ehrenfest: The Genesis of the Adiabatic Hypothesis, 1911-1914. *Archive for History of Exact Sciences*, 60(2), 209-267.
- O'Connor, J.J. & Robertson, E. F. (1997). Jan Tinbergen. Artículo consultado el 1 de marzo del 2007 en:
<http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Printonly/Tinbergen.html>
- Ordóñez, J. (2001a). *Ciencia, tecnología e historia: relaciones y diferencias*. México: Ariel.
- _____ (2001b). Sociedad Industrial y Pensamiento Positivista. En: J. L. Villacañas (ed.) *La filosofía del siglo XIX*. Madrid: Trotta, 401-422.

- Pais, A. (1984). *El señor es sutil: La Ciencia y la Vida de Albert Einstein*. Barcelona: Editorial Ariel.
- _____ (1991). *Niels Bohr's Times, in physics, philosophy, and polity*. New York: Oxford University Press.
- Pauli, W. (1994). Paul Ehrenfest. En C. P. Enz & K. von Meyenn (eds.): *Wolfgang Pauli: Writings on Physics and Philosophy*. Germany: Springer-Verlag.
- Planck, M. (1901). Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum. *Annalen der Physik*, 4, 553-563.
http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/historic-papers/1901_309_553-563.pdf
- _____ (1920). Nobel Lecture: The Genesis and Present State of Development of Quantum Theory.
http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1918/planck-lecture.html
- _____ (2000). *Autobiografía Científica y Últimos Escritos*. Madrid: Nivela Libros y Ediciones.
- Popper, K. (1991). *Conjeturas y refutaciones*. Barcelona: Paidós. Traducción de la edición original, 1963.
- Preta, L. (1993). Pensar imaginando. En: L. Preta (ed.) *Imágenes y metáforas de la ciencia*. Madrid: Alianza Editorial, 11-28.
- Purinton, R. D. (1997). *Physics in the Nineteenth Century*. London: Rutgers University Press.
- Radder, H. (1991). Heuristics and the Generalized Correspondence Principle. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 42(2), 195-226.
- Reichenbach, H. (1956/1988). *El sentido del tiempo* (2ª. Edición en español). México: Plaza y Valdés.
- Roy, A. (2002). Black-body problematic: genesis and structure. *Theory and Science*, 3(1). Consultado el 8 de octubre del 2006 en la siguiente dirección:
<http://theoryandscience.icaap.org/content/vol003.001/roy.html>
- Sánchez Ron, J.M. (1992). *El Poder de la Ciencia: historia socio-económica de la física (siglo XX)*. Madrid: Alianza Editorial.
- _____ (2001). *Historia de la Física Cuántica*. Barcelona: Editorial Crítica.

- Schorske, C. E. (1981). *Viena Fin-de-Siècle: Política y Cultura*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, S.A.
- Sharrock, W. & Read, R. (2002). *Kuhn: Philosopher of Scientific Revolution*. Malden: Blackwell Publishers, Inc.
- Sklar, L. (1993). *Physics and Chance: Philosophical Issues in the Foundations of Statistical Mechanics*. Cambridge University Press.
- Stachel, J. (ed.) (2001). *Einstein 1905: un año milagroso – cinco artículos que cambiaron la física*. Barcelona: Editorial Crítica. Traducción de la edición en inglés, Princeton University Press, 1998.
- Stehle, P. (1994). *Order, Cahos, Order: The Transition from Classical to Quantum Physics*. New York: Oxford University Press.
- Stenson, J. R. (2005). *Representations for Understanding the Stern-Gerlach Effect*. Tesis. Brigham Young University.
- Szegedi, P. (1999). Correspondence or Incommensurability? En: I. Hronszky, P. Tamás, É. Tóth, B. Wöran (eds.) *Philosophical Studies on Science and Technology*. Budapest: Arisztotelész Stúdió BT, 143-149. Consultado el 17 de febrero del 2007 en <http://hps.elte.hu/~szegedi/cikkek/corresp.doc>
- Szumilewicz, I. (1977). Incommensurability and the Rationality of the Development of Science. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 28(4), 345-350.
- Uffink, J. (2004). Boltzmann's Work in Statistical Physics. En: E. N. Zalta (ed.) *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Winter 2004 Edition)*, URL = <<http://plato.stanford.edu/archives/win2004/entries/statphys-Boltzmann/>>.
- Uhlenbeck, G. E. (1956). Reminiscences of Professor Paul Ehrenfest. *American Journal of Physics*, 4(6). Consultado en línea el 5 de enero del 2007 en: <http://scitation.aip.org/getpdf/servlet/GetPDFServlet?filetype=pdf&id=AJPJA-S000024000006000431000001&idtype=cvips&prog=normal>
- Waerden, B.L. van der (1968). *Sources of Quantum Mechanics*. New York: Dover Publications.
- Whitaker, A. (1996). *Einstein, Bohr and the Quantum Dilemma*. Cambridge University Press.

Whittaker, E. (1951). *A History of the Theories of Aether and Electricity*. New York: Thomas Publishers, 2 vols.

Zajonc, A. (1996). *Atrapando la luz: Historia de la luz y de la mente*. Barcelona: Editorial Andrés Bello Española. Traducción de la edición en inglés, Nueva York, Bantam Books, 1993.